

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Vláknově optické interferometry jako základ perimetrických  
systémů**

**Fiber Optic Interferometers as a Base Perimeter Systems**

**2015/2016**

**Martin Krupík**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Martin Krupík**

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Vláknově optické interferometry jako základ perimetrických systémů  
Fiber Optic Interferometers as a Base Perimeter Systems

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši o principech činnosti vláknově optických interferometrů.
2. Sestavte prototyp vybraného vláknově optického Mach-Zehnderova interferometru.
3. Proveďte měření šumového pozadí M-Z interferometru měřicí kartou NI USB-6210.
4. Proveďte měření vibrací vyvolaných různými testovacími osobami.
5. Porovnejte naměřená data vzhledem k šumovému pozadí interferometru, vyhodnoťte úspěšnost detekce testovacích osob.

Seznam doporučené odborné literatury:

[1] LOPEZ-HIGUERA, Jose Miguel. Handbook of optical fibre sensing technology. New York: Wiley, 2002, xxix, 795 p. ISBN 0471820539.

[2] GOODWIN, Eric P a James C WYANT. Field guide to interferometric optical testing. Bellingham, Wash.: SPIE Press, c2006, xii, 100 p. SPIE field guides, FG10. ISBN 9780819465108.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Nedoma**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016

  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 27. dubna 2016

.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Janu Nedomovi za odbornou pomoc, ochotu a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.



## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá principem fungování vláknově optických interferometrů, vysvětlením základních pojmů spojených s interferometrií a podává obraz o využitelnosti Mach-Zehnderova interferometru jako perimetrického systému detekujícího vibrační odezvu. Práce obsahuje vše potřebné pro pochopení funkce vláknových interferometrů v teoretické části. Náplní práce je sestavení a otestování vláknově optického Mach-Zehnderova interferometru jakožto senzoru citlivého na vibrační odezvu testovacích osob. Výsledky ukázaly, že jednotlivé osoby procházející kolem sestaveného senzoru vykazovaly charakteristická amplitudová spektra, která byla jedinečná pro každý testovací objekt a měla dostatečnou hodnotu odstupu signálu od šumu (SNR). Signál byl zpracován pomocí vyvinuté aplikace pro amplitudově frekvenční spektra, vyhodnocována byla maximální amplituda signálu a porovnávána vůči šumu. Lze tedy konstatovat, že sestavený prototyp Mach-Zehnderova interferometru je schopený detekovat testovací osoby se 100% účinností, čímž bychom ho mohli pokládat za perimetrické zařízení.

## **Klíčová slova**

Interferometr; Interference; Koherence; Optické vlákno, Mach-Zehnderův interferometr; Optický vláknový interferometr; Zrcadlový interferometr; Detekční systém; Perimetrický systém; Měření vibrací

## **Abstract**

Bachelor thesis deals with the principle of working fiber optic interferometer, explaining basic concepts associated with interferometry and gives a picture of the usability Mach-Zehnder interferometer as a perimeter system detects vibrations. Work includes everything you need to understand the function of fiber interferometer in the theoretical part. Content of work is construction and testing of fiber optic Mach-Zehnder interferometer as a sensor sensitive to vibration response test persons. The results showed that each person passing around constructed sensor showed characteristic amplitude spectrum which were unique to each test object, and have a value sufficient signal to noise ratio (SNR). The signal was processed by the application developed for amplitude frequency spectrum, evaluated maximum amplitude of the signal and compared to noise. It can be stated that constructed prototype Mach-Zehnder interferometer is able to detect a test person with 100% efficiency, so we could be considered perimeter devices.

## **Key words**

Interferometer; Interference; Coherence; Optical fiber Mach-Zehnder interferometer; Optical fiber interferometer; Mirror interferometer; Detector system; Perimeter system; Vibration measurement

# Obsah

Seznam použitých symbolů.....	- 9 -
Seznam použitých zkratk.....	- 10 -
Seznam ilustrací a seznam tabulek.....	- 11 -
Úvod.....	- 14 -
1 Vlastnosti světla .....	- 15 -
1.1.1 Časová perioda .....	- 15 -
1.1.2 Vlnová délka.....	- 16 -
1.1.3 Rychlost a index lomu světla.....	- 16 -
1.2 Světlo jako elektromagnetické vlnění .....	- 17 -
1.3 Interference .....	- 19 -
1.3.1 Podmínky vzniku interference.....	- 19 -
1.3.2 Konstruktivní a destruktivní interference .....	- 20 -
1.3.3 Užití interference.....	- 22 -
1.4 Koherence .....	- 22 -
1.4.1 Koherence časová.....	- 22 -
1.4.2 Koherence prostorová.....	- 23 -
2 Optická vlákna.....	- 24 -
2.1 Princip šíření .....	- 24 -
2.2 Typy optických vláken.....	- 25 -
1. Mnohovidová vlákna (se skokovou změnou indexu lomu).....	- 25 -
2. Mnohovidová gradientní (s pozvolnou změnou indexu lomu).....	- 25 -
3. Jednovidová vlákna .....	- 26 -
2.3 Módy vláken .....	- 26 -
3 Interferometry.....	- 29 -
3.1 Princip funkce .....	- 29 -
3.2 Rozdělení interferometrů .....	- 30 -
3.3 Vláknově optické interferometry .....	- 30 -
3.4 Michelsonův interferometr.....	- 31 -
3.5 Sagnacův interferometr.....	- 32 -
3.6 Fabry-Perotův interferometr .....	- 33 -
4 Mach-Zehnderův interferometr .....	- 35 -

4.1	Obecný popis Mach-Zehnderova interferometru .....	35 -
4.2	Vláknově optický Mach-Zehnderův interferometr .....	36 -
5	Sestavení prototypu vláknově optického Mach-Zehnerova interferometru .....	38 -
5.1	Laserový zdroj (EXFO FLS 2600B) .....	38 -
5.2	Izolátor .....	39 -
5.3	Coupler 50/50.....	39 -
5.4	Realizace referenční a senzorické části MZI.....	40 -
5.5	Fotodetektor PDA20H-EC thorlabs .....	42 -
5.6	Filtr- LC High Pass Filter (Horní propust).....	42 -
5.7	Měřicí karta- NI USB- 6210 .....	43 -
5.8	PC - LabVIEW .....	43 -
6	Měření šumového pozadí Mach- Zehnderova interferometru.....	44 -
7	Měření vibrací vyvolaných různými testovacími osobami .....	47 -
8	Porovnání naměřených dat vzhledem k šumovému pozadí, vyhodnocení úspěšnosti detekce testovacích osob .....	54 -
	Závěr .....	55 -
9	Použitá literatura .....	lvi

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
$\vec{B}$	T	Vektor mag. indukce
$c$	$\text{m.s}^{-1}$	Rychlost světla
$\vec{D}$	$\text{C.m}^{-2}$	Vektor el. indukce
$\vec{E}$	$\text{V.m}^{-1}$	Vektor intenzit el. pole
$\vec{H}$	$\text{A.m}^{-1}$	Vektor intenzity mag. pole
$I$	$\text{W.m}^{-2}$	Intenzita záření
$\vec{J}$	$\text{A.m}^{-1}$	Vektor hustoty el. proudu
$L$	m	Koherenční délka
$l$	m	Délka
$NA$	-	Numerická apertura
$n$	-	Index lomu
$T$	s	Časová perioda
$t$	s	Čas
$U$	V	Napětí
$V$	-	Normalizovaná frekvence
$\beta$	rad/m	Konstanta šíření
$\epsilon$	F/m	Permitivita prostředí
$\lambda$	nm	Vlnová délka
$\mu$	H/m	Permeabilita prostředí
$\pi$	3,14	Konstanta pí
$\rho$	$\text{A.m}^{-2}$	Hustota el. proudu
$\tau$	s	Koherenční doba
$\varphi$	$\pi, ^\circ$	Fáze
$\omega$	rad/s	Úhlová rychlost

---

## Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
<b>DCF</b>	Double-Clad Fiber - Vláknó s dvěma pláští
<b>EFFPI</b>	Extrinsic Fiber Fabry - Perot Interferometer, Vnější vláknový Fabry-Perotův interferometr
<b>FBG</b>	Fiber Bragg Gratings - Optické vláknové mřížky
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform - Rychlá Fourierova transformace
<b>FP</b>	Fabry-Perotův Interferometr
<b>GI</b>	Graded Index - Plynulá změna indexu lomu
<b>IFFPI</b>	Intrinsic Fiber Fabry-Perot Interferometer - Vnitřní vláknový Fabry-Perotův interferometr
<b>LAN</b>	Local Area Network - Lokální síť
<b>LED</b>	Light-Emitting Diode - Dioda emitující světlo
<b>LPG</b>	Long Period Grating - Mřížky s dlouhou periodou
<b>MZI</b>	Mach-Zehnderův interferometr
<b>SI</b>	Step Index - Skokový index lomu

## Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
1.1	Frekvenční spektrum	15
1.2	Časová perioda	16
1.3	Vlnová délka	16
1.4	Fungování elektromagnetické vlny	18
1.5	Interference na tenké vrstvě	19
1.6	Youngův pokus	20
1.7	Konstruktivní a destruktivní interference	21
1.8	Další příklad konstruktivní interference	21
1.9	Ukázka vyzářeného spektra laseru a LED zařízení	23
1.10	Koherenční šířka	23
2.1	Šíření paprsku v optickém vlákně	24
2.2	Mezní úhel a úplný odraz	24
2.3	Mnohovidové vlákno	25
2.4	Gradientní vlákno	26
2.5	Lom světla ve vlákně	26
2.6	Jednovidové vlákno	26
2.7	Konstanta šíření	27
3.1	Michelsonův zrcadlový interferometr	31
3.2	Vláknově optické provedení interferometru	32
3.3	Sagnacův Interferometr	32
3.4	Sagnacův vláknový interferometr	33
3.5	Fabry-Perotův Interferometr	33
3.6	(a) Fabry-Perotův interferometr založen na přenosu prošlého světla (b) Fabry-Perotův interferometr založen na odrazu světla	34
3.7	Konstrukční typy IFFPI	34
4.1	Zrcadlový Mach-Zehnderův interferometr	35
4.2	Mach-Zehnderův interferometr s odrazem 180°	36
4.3	Vláknový Mach-Zehnderův interferometr	37

4.4	N-cestný Mach-Zehnderův interferometr	37
5.1	Schéma sestavy vláknově optického Mach-Zehnderova interferometru	38
5.2	EXFO FLS 2600B	38
5.3	Princip optického izolátoru	39
5.4	Coupler 1x2	40
5.5	Coupler 2x2	40
5.6	Složený Mach-Zehnderův interferometr obsahující referenční a senzorické rameno uvnitř šedé krabice	40
5.7	Realizace senzorického neboli měřicího ramene	41
5.8	Realizace referenčního ramene	41
5.9	Fotodetektor PDA 20H-EC	42
5.10	Frekvenční charakteristika horní propustnosti	42
5.11	LC horní propust	42
5.12	Měřicí karta NIUSB-6210	43
6.1	Ukázka z měření šumového pozadí	44
6.2	Naměřené šumové pozadí	45
6.3	Sestava pro měření šumového pozadí	46
7.1	Trajektorie chůze testovacích osob	47
7.2	Náhled z měření z LabView	48
7.3	Amplitudové spektrum vyvolané osobou č.1 - 1m	48
7.4	Amplitudové spektrum vyvolané osobou č.1 - 2m	49
7.5	Amplitudové spektrum vyvolané osobou č.1 - 3m	49
7.6	Amplitudové spektrum vyvolané osobou č.2 - 1m	49
7.7	Amplitudové spektrum vyvolané osobou č.2 - 2m	50
7.8	Amplitudové spektrum vyvolané osobou č.2 - 3m	50
7.9	Amplitudové spektrum vyvolané osobou č.3 - 1m	50
7.10	Amplitudové spektrum vyvolané osobou č.3 - 2m	51
7.11	Amplitudové spektrum vyvolané osobou č.3 - 3m	51
7.12	Amplitudové spektrum vyvolané osobou č.4 - 1m	51
7.13	Amplitudové spektrum vyvolané osobou č.4 - 2m	52
7.14	Amplitudové spektrum vyvolané osobou č.4 - 3m	52



## Seznam ilustrací a seznam tabulek

---

<b>7.15</b>	Amplitudové spektrum vyvolané osobou č.5 - 1m	52
<b>7.16</b>	Amplitudové spektrum vyvolané osobou č.5 - 2m	53
<b>7.17</b>	Amplitudové spektrum vyvolané osobou č.5 - 3m	53

---

<b>Číslo tabulky</b>	<b>Název tabulky</b>	<b>Číslo stránky</b>
<b>1.1</b>	Příklady indexu lomu	18

---

## Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá možným využitím vláknových optických interferometrů jakožto senzoru pro detekci osob. Funkce interferometru je silně spjata s přenosem světla pomocí optických vláken a nachází tak velké uplatnění v různých případech měření. Interferometry se hodí pro měření s velikou přesností a citlivostí na základě fázového posuvu optických vln.

Teoretická část práce se zabývá především vysvětlením hlavních principů a pojmů v oblasti světla a interferometrie. První kapitola se věnuje vlastnostem a popisu světla z fyzikálního pohledu. Poté je vysvětleno, co se skrývá pod pojmem interference, bez nichž by interferometry nemohly fungovat. Následující kapitola se zabývá druhy optických vláken a šířením světla v nich. Dále je pozornost věnována interferometrům obecně a jejich rozdělení. V poslední kapitole teoretické části je probrán Mach-Zehnderův interferometr, který posloužil jako zařízení pro měření praktické části.

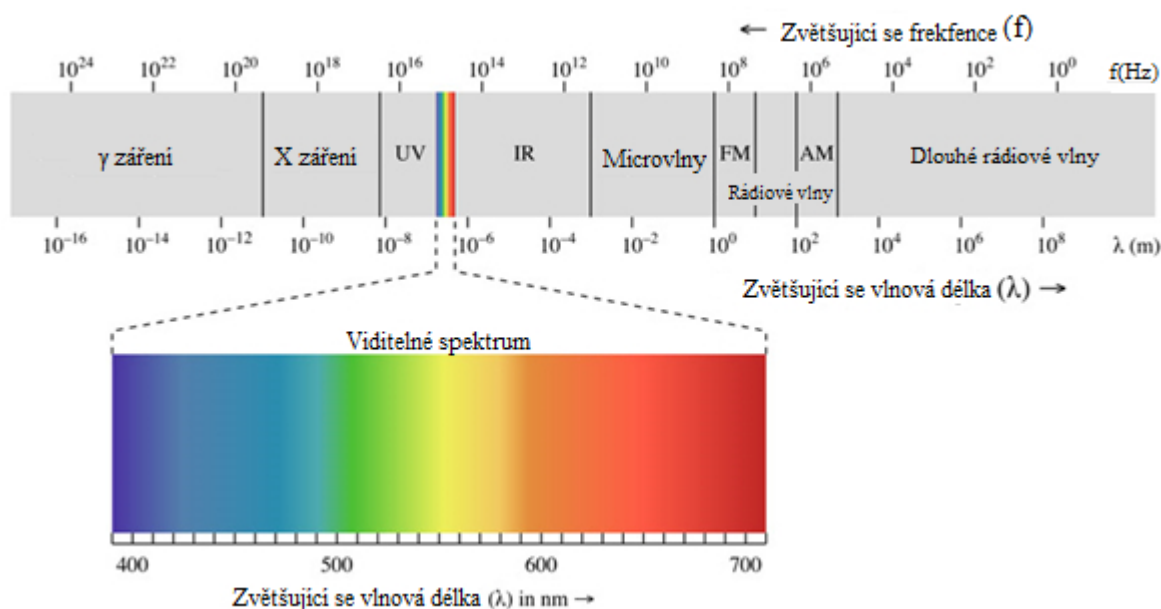
Praktická část se skládá ze tří částí. První část se věnuje sestavení vláknově optického Mach-Zehnderova interferometru. Následně další část popisuje měření šumového pozadí pomocí vláknově optického MZI.

Závěrečná praktická část je věnována měření vibrační odezvy testovacích osob.

# 1 Vlastnosti světla

Všudypřítomná energie neboli světlo, které nás stále obklopuje každý den a dokonce i naše tělo vyzařuje určitou část světla. Teprve koncem 19. století se objevují první poznatky, jak chápat samotné světlo, což bylo do této chvíle nezodpovězeno.

Z fyzikálního pohledu je světlo elektromagnetické záření založené na korpuskulárním charakteru. Na základě tohoto principu můžeme světlo chápat jako šířící se vlnu a jako proud částic (fotonů). Navzájem se nevylučují, ale někdy je potřeba chápat světlo více jako vlnění, anebo šířící se fotony. Jednodušeji jej můžeme chápat jako proud částic, které při šíření vykonávají ještě navíc kmitavý pohyb. Světlo má velikou škálu vlnových délek tvořící frekvenční spektrum. Viditelné spektrum má vlnové délky v rozmezí 790 nm až 390 nm. Záření o vlnových délkách nad viditelným spektrem se nazývají infračervené a pod spektrem ultrafialové, které jsou škodlivé. [1; 2]



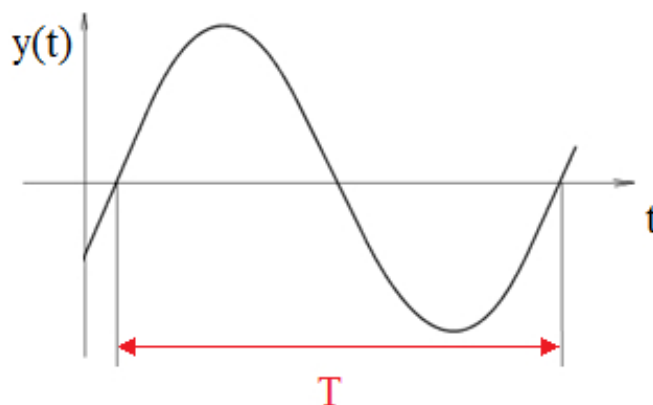
Obrázek 1.1: Frekvenční spektrum

## 1.1.1 Časová perioda

Časová perioda  $T$  je doba, během které se provede jedno opakování periodického děje (kmitu). Vztah pro výpočet:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{\lambda}{v} \quad (1.1)$$

kde  $\omega$  je úhlový kmitočet. [1]

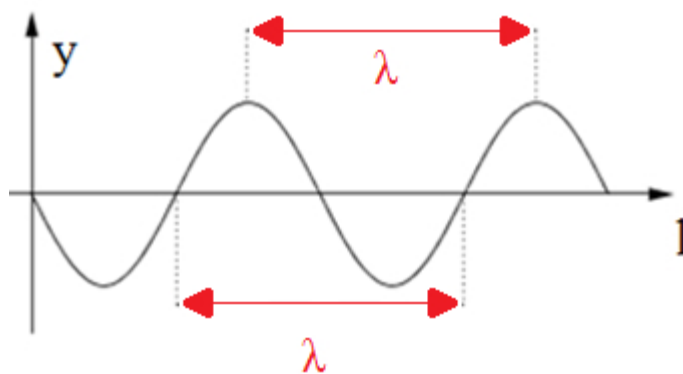


Obrázek 1.2: Časová perioda

### 1.1.2 Vlnová délka

Vlnová délka je vzdálenost, kterou uběhne vlna během jednoho kmitu. Značíme ji písmenem z řecké abecedy  $\lambda$ - Lambda. Vypočítáme ze vztahu [1]:

$$\lambda = v * T = \frac{v}{f} \quad (1.2)$$



Obrázek 1.3: Vlnová délka

### 1.1.3 Rychlost a index lomu světla

Světlo se šíří rychlostí  $c = 3 * 10^8 m/s$  vakuem a v kterémkoli jiném prostředí se šíří pomaleji. Tato rychlost je maximální možná, kterou se mohou objekty pohybovat. Pro určení kolikrát méně se pohybuje světlo v libovolném látkovém prostředí, slouží bezrozměrná veličina index lomu světla, který se značí jako  $n$  a vypočítáme jej ze vztahu:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.3)$$

kde  $v$  je rychlost šíření v daném prostředí. Hodnota indexu lomu je vždy větší než 1. [1; 3]

Tabulka 1.1: *Příklady indexu lomu* [4]:

Látka	Index lomu (589 nm)
Voda	1,33
Vzduch	1,00026
Sklo	1,5- 1,9
Diamant	2,42
Led	1,31
Vak	1
Křemík	4,01

## 1.2 Světlo jako elektromagnetické vlnění

James Clerk Maxwell roku 1865 zformuloval osm rovnic, které se postupem času zjednodušily pouze na čtyři. Rovnice popisují chování elektromagnetického pole, které se šíří prostorem a kde je dokázána souvislost mezi magnetismem a elektřinou, ale také i naopak. Existují v podobě integrálního nebo diferenciálního zápisu, který si uvedeme.

$\vec{H}$  = intenzita magnetického pole

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

$\vec{j}$  = hustota elektrického proudu

$\mu$  = permeabilita

$\vec{E}$  = intenzita elektrického pole

$\rho$  = hustota elektrického proudu

$\epsilon$  = permitivita prostředí

$\vec{D}$  = elektrická indukce

$\vec{B}$  = magnetická indukce

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

### Diferenciální tvar:

#### 1. První rovnice (vychází z Ampérova zákona):

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.4)$$

Rotující vektory intenzity magnetického pole vznikají, pokud dochází k toku elektrického proudu nebo ke změně elektrického pole v čase.

#### 2. Druhá rovnice (vychází z Faradayova indukčního zákona):

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.5)$$

Vektory intenzity elektrického pole vznikají tam, kde dochází v čase ke změnám magnetického pole.

**3. Třetí rovnice (vychází z Gaussova zákona elektrostatiky):**

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (1.6)$$

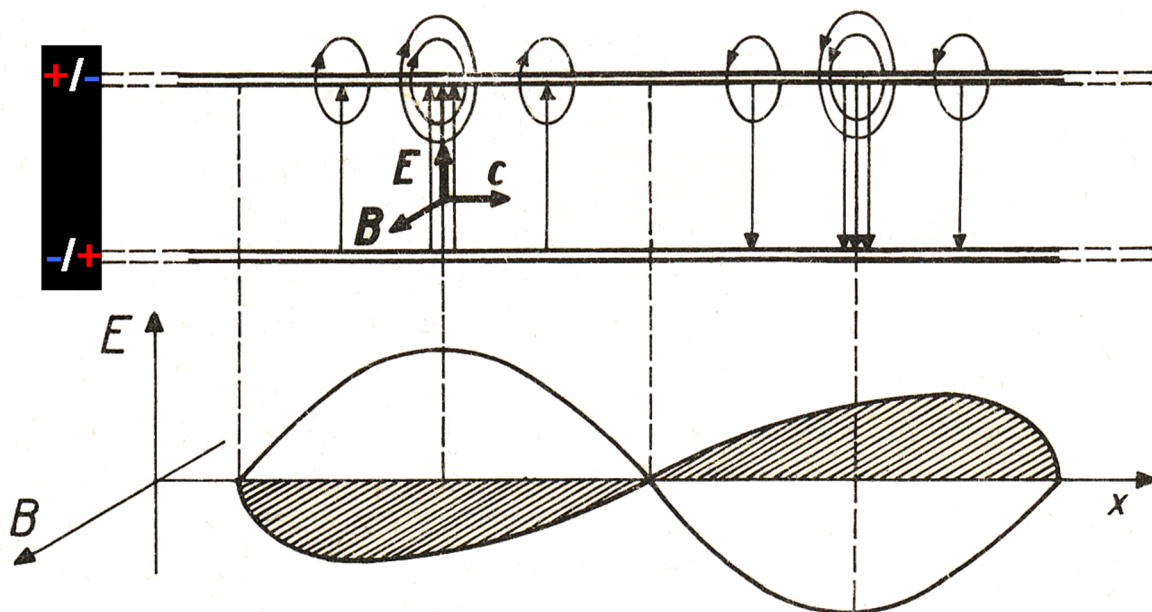
Vektory elektrického pole vznikají tam, kde je volný náboj.

**4. Čtvrtá rovnice (vychází ze zákona spojitosti indukčního toku):**

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (1.7)$$

Neexistuje částice nesoucí magnetický náboj, ze kterého by se indukční čáry šířily, tudíž jsou uzavřené.

[5; 1]



Obrázek 1.4: Fungování elektromagnetické vlny, převzato z [6]

### 1.3 Interference

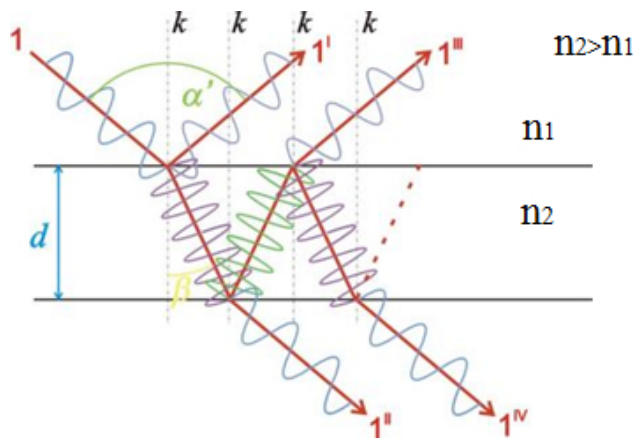
Interference neboli interferenční jev je z fyzikálního hlediska velmi důležitým jevem, který má široké uplatnění v technice a na němž je založena funkce Mach-Zehnderova interferometru.

Obecně nastává tehdy, pokud dochází ke střetávání jevů či hmoty zapříčiňujících vzájemné ovlivňování. V optice touto vlastností disponují elektromagnetické vlny (světlo), které se v určitém časovém okamžiku potkávají a sjednocují. Výsledná vlna je důsledkem skládání zesílena (konstruktivní interference) nebo naopak zeslabena (destruktivní interference). Podobným způsobem dochází i k interferenci mechanických vln. Interference světla je tak jedním z důkazů vlnové povahy světla.

U interference rozlišujeme dva případy na základě počtu vstupujících vln, kdy se interference účastní pouze dvě nebo více vln. Právě se dvěma interferujícími vlnami pracuje Mach-Zehnderův interferometr. [7; 8]

#### 1.3.1 Podmínky vzniku interference

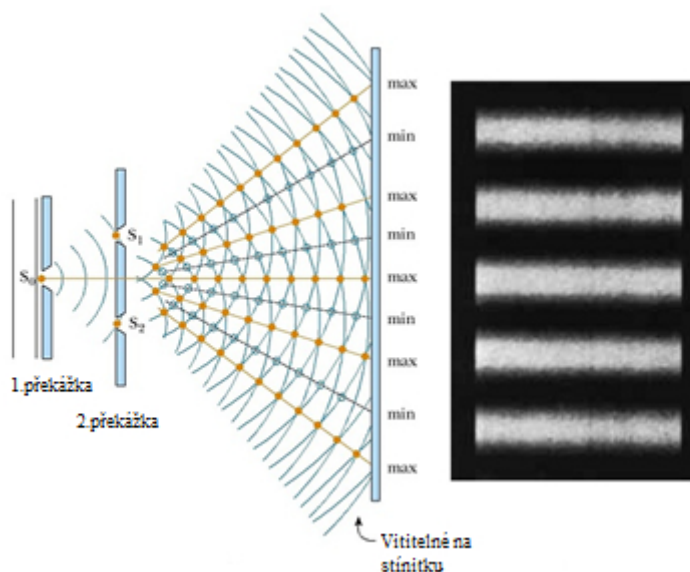
Pokud bychom chtěli pozorovat interferenci, je nutné, aby interferující vlny byly koherentní. Koherentní vlny jsou takové vlny, které mají stejnou frekvenci, směr šíření a také konstantní fázový rozdíl. U přirozeného (bílého) světla je tento jev nepozorovatelný, jelikož světelné vlny jsou emitovány o různých frekvencích a čas, po který je fázový rozdíl konstantní, je velmi krátký. Celý jev je pro oko příliš rychlý, jen dokáže vnímat střední hodnotu osvětlení, tudíž je jev okem nepostřehnutelný. Interferenci lze například sledovat na tenké vrstvě vody či bubliny, kde při odrazu se sebou interferují koherentní vlny. [9; 10; 7]



Obrázek 1.5: Interference na tenké vrstvě

Na obrázku 1.5 lze vidět, že dopadající paprsky na rozhraní dvou prostředí se částečně odráží a lámou. Odražené paprsky se šíří posunutou fází o  $180^\circ$ , jelikož se odráží od prostředí opticky hustšího ( $n_2 > n_1$ ), nebo v opačném případě, jestli dopadá na rozhraní z opticky hustšího do řidšího prostředí, fáze odražených paprsků se nemění. Nad vrstvou lze sledovat interferenci paprsku  $1^I$  a  $1^{III}$ . Pod vrstvou potom  $1^{II}$  a  $1^{IV}$ . [11]

Dále ke sledování interference lze docílit dvouštěrbinovým experimentem (Youngův pokus).



Obrázek 1.6: Youngův pokus, převzato z [12]

Pokud se štěrba  $S_0$  chová jako bodový koherentní zdroj světla, která osvětluje další dvě štěrby  $S_1$  a  $S_2$ , lze poté na stínítku pozorovat světlé a tmavé proužky vzniklé interferencí paprsků šířící se ze štěrbin  $S_1$  a  $S_2$ . Pokud bude na stínítku docházet k zesílení či ztlumení proužků je dán  $\Delta l$  dráhovým rozdílem paprsků, které dopadají do stejného bodu na stínítku.

Podmínka pro vznik interferenčního maxima (zesílení) je dána:

$$\Delta l = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda \quad (1.8)$$

Podmínka pro vznik interferenčního minima (ztlumení) je dána:

$$\Delta l = 2(k - 1) \frac{\lambda}{2} \quad (1.9)$$

$k$  je řád interferenčního maxima a minima (nabývá hodnot celého čísla).

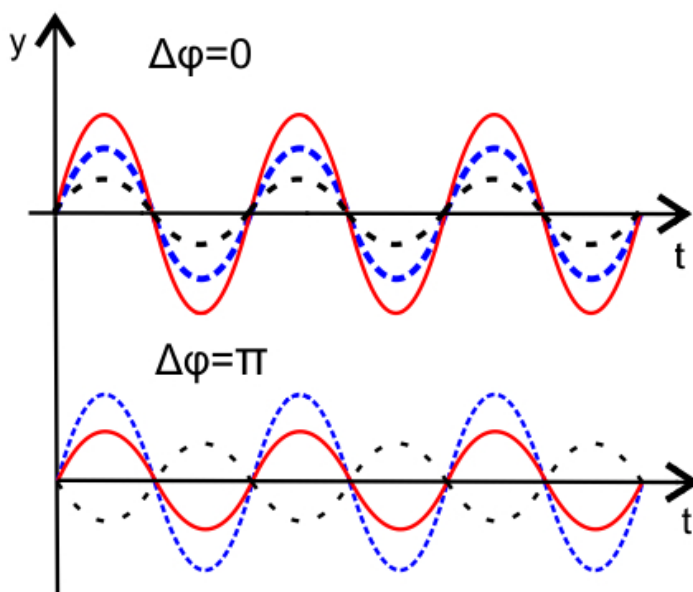
Jednoduše řečeno, pokud se dráhový rozdíl liší o  $k$ -násobek vlnové délky, fázový posun nevzniká, tudíž dochází k zesílení. V opačném případě se tvoří tmavé proužky. [11]

### 1.3.2 Konstruktivní a destruktivní interference

Je-li maximální amplituda výsledné složené vlny větší, jako maximální amplituda vstupních vln, jedná se o interferenci konstruktivní. Jestliže je maximální amplituda složené vlny již menší, než jedna maximální amplituda ze vstupních vln, jedná se o destruktivní interferenci. V ideálním případě se maximální amplituda složené vlny vypočítá jako součet maximálních amplitud vstupujících vln pro

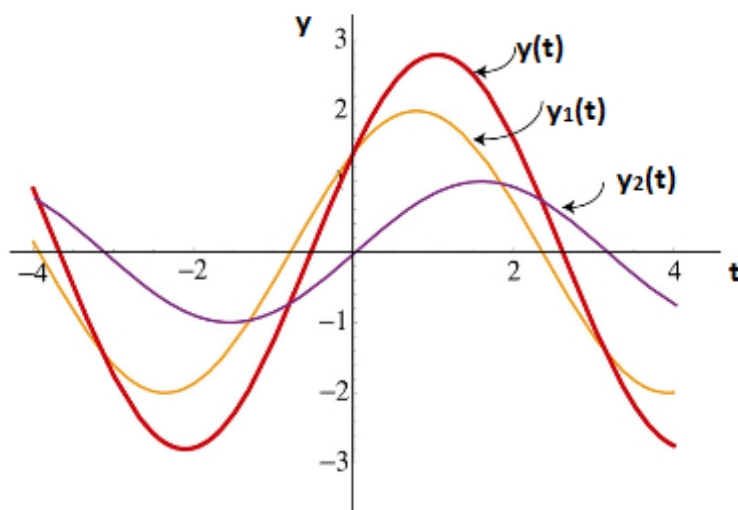


konstruktivní jev, ale jen v případě pokud vstupní vlny kmitají stejnou frekvencí a fázový rozdíl je roven 0. U destruktivního jevu má výsledná amplituda hodnotu rozdílu maximálních amplitud vstupních vln, ale musí být splněna podmínka stejné frekvence a posunutí fáze o 180 stupňů ( $\pi$ ). [13]



Obrázek 1.7: *Konstruktivní (horní část) a destruktivní (dolní část) interference*

Ne vždy ovšem platí, že se výsledná amplituda vypočítá součtem, popřípadě rozdílem vstupních amplitud, což je patrné z následujícího obrázku, na kterém není fázový rozdíl u vstupujících vln konstantní. [7]



Obrázek 1.8: *Další příklad konstruktivní interference, kde složená vlna je  $y(t)$*

### 1.3.3 Užití interference

Interference je velmi efektivní, jestliže potřebujeme měřit s naprostou přesností v řádech nanometrů, a proto má pro nás pestré použití. Slouží k určení vlnových délek, indexu lomu kapalin a plynů. Dále ji lze využít například při kontrole rovinných a kulových ploch čoček, optických hranolů, při tvorbě protiodrazových vrstev u objektivu fotoaparátů, projekčních přístrojů a na sklech brýlí. Tohoto jevu využívá také holografie při záznamu na film. [14]

## 1.4 Koherence

Koherence silně souvisí s viditelností interference. Pokud nedocílíme koherence, nelze vnímat interferenční jevy. Dosáhneme jí v případě, pokud mezi dvěma nebo více vlnami existuje konstantní fázový rozdíl a stejná frekvence kmitání. Rozlišujeme koherenci časovou a prostorovou. Oba typy pomáhají chápat chování vln, ale jsou to pouze ideální případy, které se v realitě poněkud liší. [15]

### 1.4.1 Koherence časová

Časová koherence závisí na podobnosti elektromagnetického či vlnového pole v určitém bodě prostoru v měnícím se čase. Pokud vlna z vycházejícího zdroje v čase  $t$  a stejná vlna v časovém intervalu  $t+t_1$ , jejichž fázový rozdíl je konstantní, lze říci, že existuje koherence časová. Pokud za  $t_1$  dosadíme jakoukoli hodnotu a fázový rozdíl bude opět konstantní, jedná se o úplnou časovou koherenci. Platí-li jen pro určité hodnoty  $t_1$ , definujeme ji jako částečnou koherenci pro určitý časový interval. Důležitým parametrem je koherenční délka, která udává, po jakou délku od zdroje koherence trvá nebo jinak řečeno, do kdy je interference viditelná. Obecně lze koherenci chápat jako schopnost interferovat při vzájemných časových posunech emitovaného záření. Koherenční délka souvisí na množství vlnových délek, které zdroj emituje. Čím větší množství, tím více se snižuje koherenční délka. Nejlepším příkladem jsou monochromatické zdroje, které disponují nekonečnou koherencí. U laserů se tato hodnota pohybuje v desítkách metrů

Výpočet přibližné koherenční délky je dán vztahem:

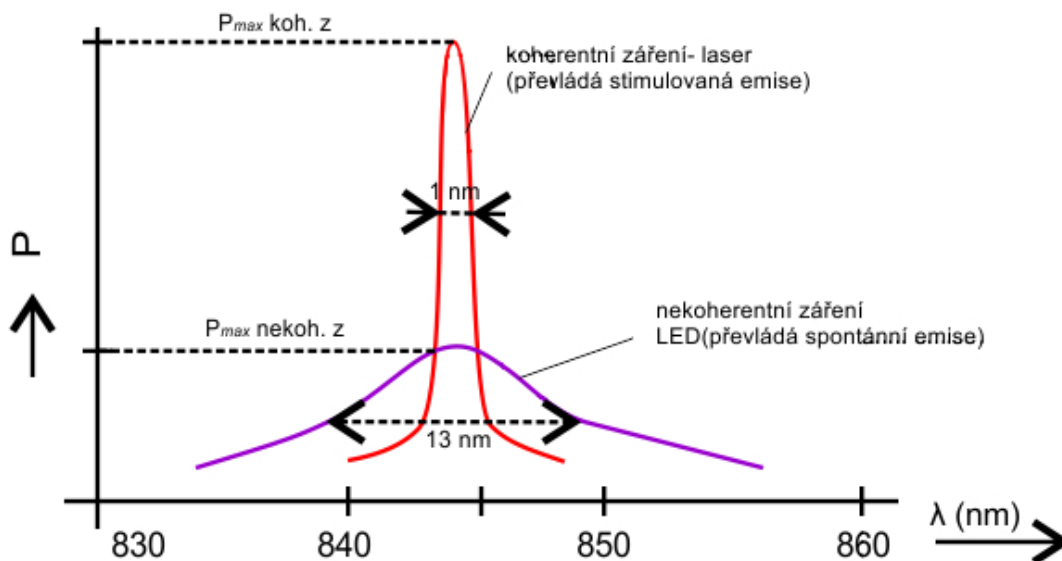
$$L = c * \tau \quad (1.10)$$

kde  $c$  je rychlost šíření a  $\tau$  je koherenční doba.

Konečná rovnice pro výpočet koherenční délky je:

$$L = \frac{c}{\Delta \nu} \quad (1.11)$$

kde  $\Delta \nu$  je šířka spektrální čáry. [15; 16]

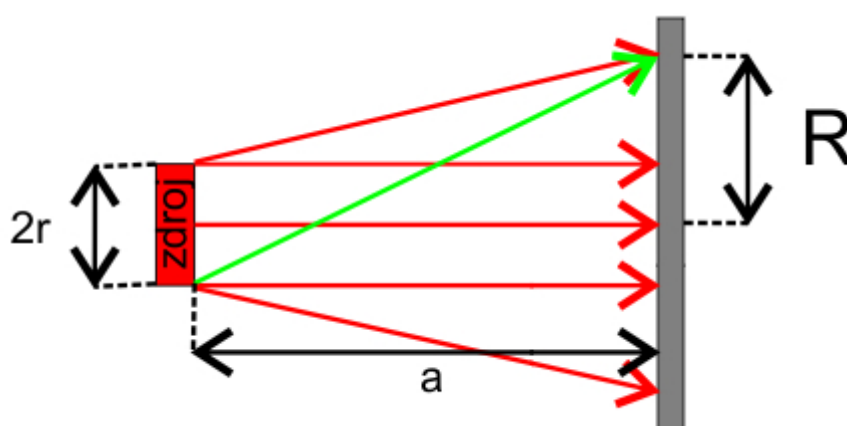


Obrázek 1.9: Ukázka vyzářeného spektra laseru a LED záření

#### 1.4.2 Koherence prostorová

Prostorová koherence souvisí se vzájemnou podobností vln v různých bodech prostoru a udává, do jaké míry je záření ze zdroje v prostoru jednotné. Parametrem popisujícím prostorovou koherenci je koherenční šířka. Je to příčná vzdálenost  $R$  na stínítku mezi vyzařovací osou zdroje a místem s nejnižší intenzitou interference, která vzniká skládáním paprsků z protilehlých okrajových bodů zdroje. Pro výpočet platí zjednodušený vztah, který závisí na šířce zdroje  $2r$ , vzdálenosti stínítka od zdroje  $a$  a vlnové délky záření  $\lambda$ .

$$R = a * \frac{\lambda}{4r} \quad (1.12)$$



Obrázek 1.10: Koherenční šířka

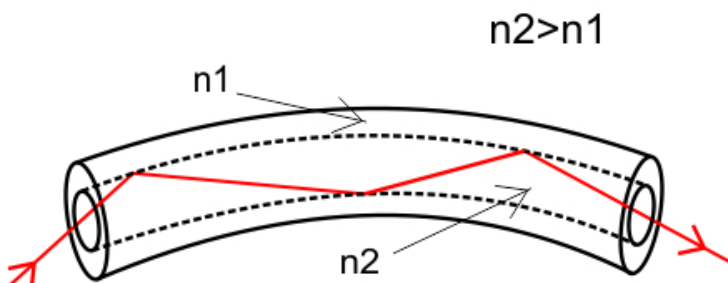
Jestliže je vzdálenost mezi paprsky menší než  $2R$ , jedná se o paprsky prostorově koherentní. Velké koherenční šířky dosahují nejčastěji lasery, jejichž zdroje záření jsou v porovnání s ostatními zdroji prakticky zanedbatelné. [16; 15]

## 2 Optická vlákna

Optická vlákna dnes slouží jako moderní a nejlepší způsob k přenosu dat prostřednictvím světelných impulsů při vyšších přenosových rychlostech. Vlákna jsou vyrobena ze skleněných materiálů (z křemene) nebo také z průhledných plastů. V porovnání s technologií metalických vedení nedochází k tak velkým ztrátám při přenosu, nevedou elektrický proud, jsou odolné vůči vodě a velmi laciné pro provoz. Nicméně především dochází k mnohem vyšší rychlosti při přenosu dat. [1; 17; 18]

### 2.1 Princip šíření

K přenosu informací v optických vláknech dochází pomocí správného vedení světla na základě indexů lomu. Paprsek šířící se vláknem dopadá z opticky hustšího prostředí na rozhraní dvou prostředí (jádra a obalu) a odráží se od něj pod takovým úhlem, který zaručuje 100% odraz. Index lomu jádra je vždy větší než index lomu pláště.

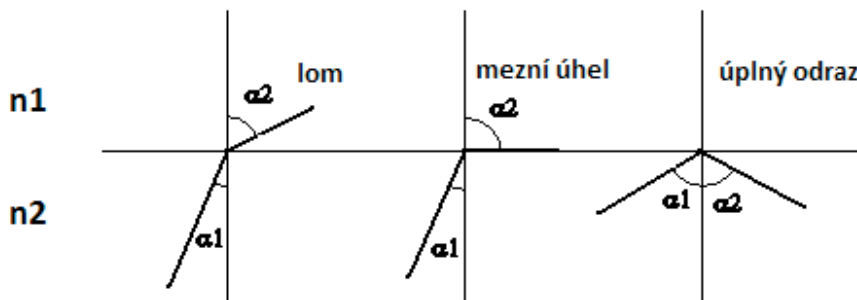


Obrázek 2.1: Šíření paprsku v optickém vlákně

Úplný odraz souvisí s mezním úhlem (kritickým), jenž je úhel dopadu, po kterém nastává úhel lomu 90 stupňů ( $\sin \alpha_2 = 1$ ). Dopadá-li paprsek pod větším úhlem než kritickým, nastává právě totální 100% odraz. Pro každá jiná prostředí má mezní úhel odlišnou hodnotu. Pokud se paprsek odráží pod jiným úhlem, dochází k nechtěnému lomu světla do druhého prostředí, což vede ke ztrátám. S výpočtem souvisí Snellův zákon lomu mající podobu:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.1)$$

ze kterého vyplývá, že poměr sinů úhlu dopadu a lomu pro jistá dvě prostředí je rovný poměru indexu lomu těchto prostředí ( $n_2 > n_1$ ). [19; 1; 17]



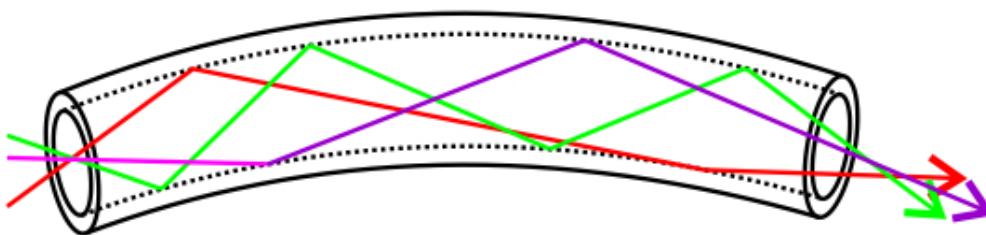
Obrázek 2.2: Mezní úhel a úplný odraz ( $n_2 > n_1$ )

## 2.2 Typy optických vláken

Neustále dochází k rozvoji a zlepšování přenosových vlastností optických vláken. Změny se týkají velikosti šířky pásma, útlumu, nízkých výrobních nákladů i hmotnosti. Z tohoto důvodu existuje mnoho konstrukčních variant dělících se do mnoha podkategorií. V průběhu historie se však vyvinuly 3 základní typy vláken, které se dělí podle počtu přenášených vidů (módů) a profilu indexu lomu. [20]

### 1. Mnohovidová vlákna (se skokovou změnou indexu lomu)

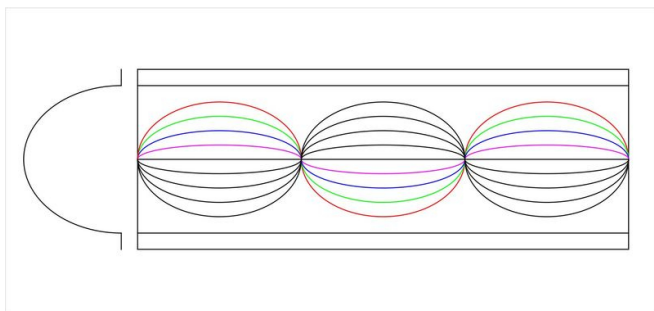
Hlavní vlastností, kterou se vyznačují mnohovidová vlákna je možnost vést větší množství vidů (paprsků) zároveň. Průměr jádra vlákna má velké rozměry, zejména se používají hodnoty 62,5 nebo 50  $\mu\text{m}$ . Na vstupu jsou nejčastěji LED generátory vytvářející několik paprsků šířících se vláknem pod jiným úhlem na základě úplného odrazu. Na výstupu jsou poté světelné impulsy zaznamenány pomocí světelných detektorů. Vláknem s větším množstvím vidů se využívají především pro přenos na krátkou vzdálenost - okolo 500m. Z tohoto důvodu najdou největší využití především v LAN sítích. Hlavním důvodem, proč se nepoužívají na dlouhé trasy, je vidová disperze, která s přibývajícím vzdáleností stále narůstá. [17; 21; 22]



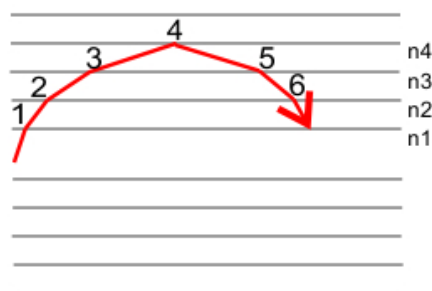
Obrázek 2.3: Mnohovidové vlákno

### 2. Mnohovidová gradientní (s plynulou změnou indexu lomu)

Na základě problému při přenosu u vláken se skokovou změnou indexu lomu byly vyvinuty vlákna s plynulou změnou indexu lomu neboli gradientní vlákna, která tyto nedostatky eliminují. Nejdůležitější změnou oproti předchůdci nastala u paprsků šířících se vláknem, které se neustále při přenosu potkávají, a tím nevzniká na výstupu žádná vidová disperze. To je docíleno proměnným indexem lomu v jádře, který se směrem k obalu postupně snižuje a naopak. Takto dochází k prakticky neustálému ohybu světla. Vláknem tohoto typu vynikají přenosovou rychlostí okolo stovek Mbit/s na vzdálenost několika kilometrů.



Obrázek 2.4: Gradientní vlákno, převzato z [22]

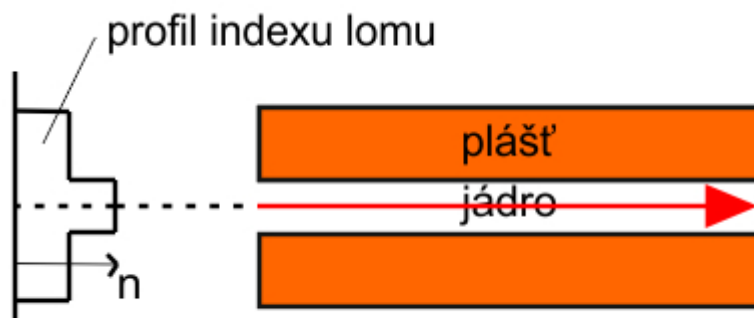


Obrázek 2.5: Lom světla ve vlákne

Na obrázku 2.5 lze vidět průchod paprsků jádrem. Paprsky s delší optickou trasou procházejí opticky řidším prostředím než paprsky vykonávající kratší dráhu. To jim umožňuje šířit se rychleji v jádře, čímž vykompenzují dráhový rozdíl a neustále se setkávají. [22; 17; 21]

### 3. Jednovidová vlákna

Jsou taková optická vlákna, kterými se šíří jediný paprsek podél osy jádra využívající techniku skokové změny indexu při ohybu. Průměr takového vlákna je 8-10 $\mu\text{m}$ , které jsou daleko menší než u mnohovidových. Z důvodu přenosu jednoho vidu nedochází k vidové disperzi a vyznačuje se velmi malým útlumem. Při generování paprsku na vstupu a jeho následné detekci na výstupu vlákna je potřeba kvalitnější, a tím dražší technika. Nejčastěji na vstupu polovodičové lasery. Pro velmi vysoké přenosové rychlosti se používají k přenosům na dlouhé vzdálenosti, kde rychlost dosahuje v současnosti až 25 Tbit/s. [17; 22; 21]



Obrázek 2.6: Jednovidové vlákno

### 2.3 Módy vláken

K popisu fungování optických vláken používáme nejčastěji termín paprsek, jenž se pohybuje ve vlákne jako přímka. Pokud se podíváme pod drobnohled, zjistíme, že skutečnost je poněkud odlišná. Šíření probíhá pomocí takzvaných módů (vidů), které se jen přibližují vlastnostem paprsků. Mód je určité rozložení elektromagnetické energie ve vlnovodu. Energie je navázaná a rozdělena do vlnovodu

takovým způsobem, aby se módy mohly šířit pod správným úhlem a tvořit stojaté vlnění. Tyto energie jednotlivých módů tvoří elektromagnetické pole. Módy dělíme na tři druhy:

**1. Vyzařující módy**- šířící se módy nesplňují podmínku 100% odrazu od rozhraní jádra a pláště. Důvodem je navázání módu pod úhlem, který je větší než numerická apertura. Dochází tak k nechtěnému lomu a ztrátě energie.

**2. Vedené módy**- jednotlivé módy se šíří ideálně na základě totálního odrazu od rozhraní a nedochází k lomu směrem do pláště. K jejich vyvázání z jádra by muselo dojít k velkému ohybu vlákna.

**3. Tunelující módy**- jsou to módy nestabilní. Pohybují se na rozhraní vyzařujících a vedených módu. Totální odraz od rozhraní zde není splněn. Jsou velmi náchylné k vyvázání módu z vlákna. [1]

Konstanta šíření pro vedené módy (osový mód):

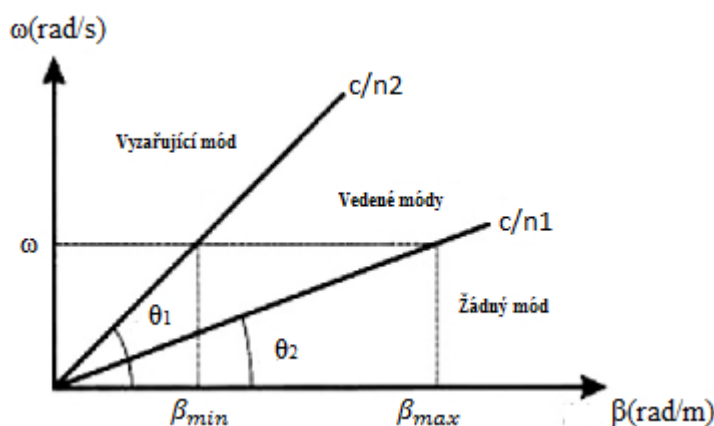
$$\beta_{min} = \frac{2\pi \cdot n_2}{c} \quad (2.2)$$

Konstanta šíření pro vedené módy (mezní mód):

$$\beta_{max} = \frac{2\pi \cdot n_1}{c} \quad (2.3)$$

Vedené módy splňují podmínku [1]:

$$\frac{2\pi \cdot n_2}{\lambda} \leq \beta \leq \frac{2\pi \cdot n_1}{\lambda} \quad (2.4)$$



Obrázek 2.7: Konstanta šíření

### Ovládání počtu módu ve vlákne

Pro výpočet celkového počtu módu ve vlákne slouží normalizovaná frekvence, která využívá geometrické a materiálové vlastnosti vlákna. Pro vlákna jednomódová platí podmínka  $V \leq 2,405$ . Výpočet je dán vztahem:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} d * NA \quad (2.5)$$

kde  $d$  je průměr vlákna a  $NA$  numerická apertura.

Poté na základě známé hodnoty normalizované frekvence vypočteme počet módu v SI (step index) vlákne následující rovnicí:

$$M_{SI} = \frac{V^2}{2} \quad (2.6)$$

Pro vlákna gradientní (GI- graded index) se trochu liší [1] :

$$M_{GI} = \frac{V^2}{4} \quad (2.7)$$

Potřebujeme-li však ovládat počet módu ve vlákně, je ze vztahu normalizované frekvence patrné, že postačí měnit jednotlivé parametry. V případě, že chceme zmenšit počet módů, je potřeba vybrat vlákno s menším průměrem jádra či menším rozdílem obou indexů lomu nebo zvětšit vlnovou délku použitého světla. Musíme ovšem dávat pozor na to, aby byla splněna podmínka úplného odrazu. Druhá důležitá podmínka je, aby průměr jádra byl větší jako vlnová délka. Pro správné použití vlnové délky slouží vztah pro zjištění mezní vlnové délky. Tato délka udává, při jaké nejkratší vlnové délce se chová vlákno jako jednovidové. Pokud mezní vlnová délka bude dostatečně překročena, stane se mnohovidovým.

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{V} d * NA \quad (2.8)$$

Obvyklé využívané hodnoty (jednomódová vlákna):  $d=8-9 \mu\text{m}$ ,  $\lambda= 1310, 1550 \text{ nm}$ . [1; 23; 24]



### 3 Interferometry

Optické interferometry patří do skupiny velmi citlivých zařízení sloužících pro přesná měření délek, teplot, tlaku, indexu lomu, silových polí. Své využití našly i v astronomii. Dnes mají optické interferometry velmi široké využití. Jsou konstruovány pomocí několika zrcadel nebo pomocí optických vláken. Celá jejich funkce je založena na principu interference elektromagnetického záření. Jejich počátky vzniku sahají do 19. století. [25]

#### 3.1 Princip funkce

Jelikož je fungování interferometru závislé na interferenci, vyžaduje každé měření pomocí interferometru výskyt dvou nebo více světelných vln někde v prostoru. U výsledné vlny, která vznikne na základě interference (skládání) vln v prostoru, se zkoumá intenzita paprsku. Výsledná intenzita se nemusí rovnat součtu intenzit vstupujících vln do interference. Rovná samotnému součtu je pouze v případě, jestliže se jedná o vlny se stejnou frekvencí s fázovým posuvem o  $90^\circ$  nebo  $270^\circ$ . Podmínkou interference je koherence obou vln. Takové vlny mají konstantní fázový rozdíl a kmitají stejnou frekvencí. Při interferenci dvou vln se stejnou frekvencí o komplexních amplitudách  $U_1$  a  $U_2$  má výsledná vlna stejnou frekvenci mající komplexní amplitudu:

$$U = U_1 + U_2 \quad (3.1)$$

Pro výslednou intenzitu platí vztah:

$$I = |U|^2 = |U_1|^2 + |U_2|^2 \quad (3.2)$$

Pokud dosadíme za  $U_1 = I_1^{1/2} \exp i\varphi_1$  a za  $U_2 = I_2^{1/2} \exp i\varphi_2$ , kde  $\varphi_{1,2}$  jsou fáze jednotlivých vln a  $I_{1,2}$  jsou intenzity těchto vln. Poté jsme schopni vyvodit interferenční rovnici:

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 * I_2)^{1/2} \cos(\varphi) \quad (3.3)$$

kde  $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$ . Tudíž z naměřené intenzity lze vypočítat fázový posun vln, čehož právě optické interferometry využívají. Níže jsou uvedeny nejznámější interferometry a jejich výpočet fázového rozdílu.

Pro Sagnacův int. platí:

$$\varphi = \frac{8\pi\omega A}{c\lambda} \quad (3.4)$$

Pro Michelsonův int. platí:

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} n(L_1 - L_2) \quad (3.5)$$

Pro Mach-Zenderův int platí:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} n(L_1 - L_2) \quad (3.6)$$

Veličiny obsažené výše:  $A$  - plocha interferometru ( $\pi R^2$ ),  $\omega$  - úhlová rychlost rotace,  $R$  - poloměr kruhu,  $n$  - index lomu jádra (prostředí, ve kterém se šíří paprsek),  $L_1$  - délka měřicího vlákna (ramene),  $L_2$  - délka referenčního vlákna (ramene),  $\lambda$  - vlnová délka zdroje záření. [25] [26]

### 3.2 Rozdělení interferometrů

Interferometry se často dělí na **lineární a nelineární**. Lineární zařízení pracuje na principu rozdělení jedné vlny na dvě vlny uvnitř interferometru, které jsou fázově zpožděny a u nichž je měněn také směr. Obě vlny jsou následně na výstupu opět sloučeny do jedné vlny, u které zaznamenáváme výslednou intenzitu. Na druhé straně u nelineárních interferometrů jsou využity k fázovému zpoždění optické nelineární jevy- závislost indexu lomu na intenzitě záření. Z porovnání obou typů vyplývá, že lineární typy nepotřebují náročné nastavování a mohou fungovat ve volném prostoru. Mezi lineární systémy se řadí Mach-Zehnderův, Michelsonův, Kruhový, Sagnacův interferometr. Mach-Zehnderův interferometr využitý jako spínač nebo elektrooptický modulátor může být pokládán za nelineární interferometr. [26]

Také se mohou interferometry dělit podle rozdílného účelu měření následovně:

- 1. Interferenční komparátory**- slouží pro přesná měření délek. Typickým příkladem je Michelsonův interferometr.
- 2. Interferenční refraktometry**- systémy k měření indexu lomu kapalin a plynů, ke zjištění tlaku či teploty plynů i plazmatu. Například Jaminův, Rožděstvenského-Machův, Rayleighův interferometr.
- 3. Interferenční spektroskopy**- zařízení sloužící k určení struktury spektrálních čar. Například- Michelsonova stupňová mřížka, Fabryův-Perotův interferometr, Lummerova- Gehrckeova deska.

Dále mohou interferometry posloužit ke zjištění úhlového průměru hvězd, k měření magnetického a elektrického pole i k detekci gravitačních vln.

Někdy se můžeme setkat také s rozdělením interferometrů podle počtu vln, které spolu interferují. Jsou to **dvousvazkové a vícesvazkové interferometry**. Mezi nejvýznamnější dvousvazkové řadíme Michelsonův, Mach-Zehnderův, Sagnacův interferometr. Vícesvazkovým je Fabry- Perotův interferometr. [27; 25]

### 3.3 Vláknově optické interferometry

Oproti zrcadlové verzi interferometrů je zde základním prvkem pro výrobu optické vlákno, na němž vzniká fázový posun paprsku způsobený změnou délky vlákna či indexu lomu. Klíčový fázový posun je poté zjištěn na základě interference. Konstrukci vláknových interferometrů rozdělujeme do tří skupin:

#### 1. Dvojamenný jednomódový interferometr

Jak už název napovídá, dvojamenný jednomódový interferometr se skládá ze dvou ramen. Každé rameno je reprezentováno optickým vláknem. Jedná se o optické vlákno referenční a senzorové. Výsledný fázový posun je dán porovnáváním fází obou ramen. Dvojamenné interferometry patří mezi nejpoužívanější. Typickými zástupci jsou Mach-Zehnderův a Michelsonův interferometr.

#### 2. Jednovláknový interferometr s obousměrnou optickou vazbou

V cívce, která je vyrobena z optického vlákna, se šíří dva paprsky s opačným směrem, které jsou na konci fázově porovnávány. Mezi nejznámější provedení řadíme Sagnacův interferometr.

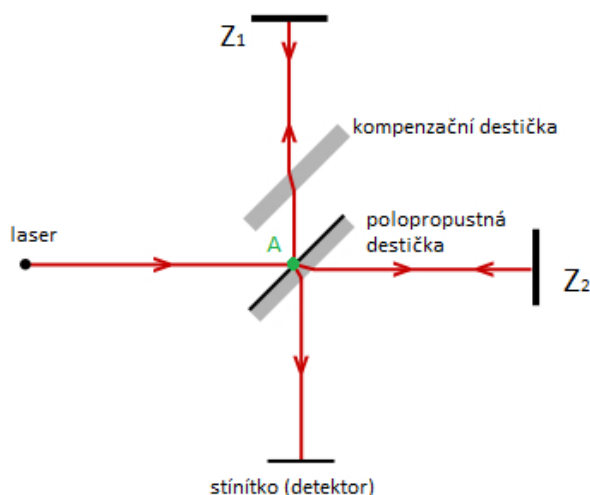
### 3. Mezimódový interferometr

Využívá interferenci dvou a více paprsků, jež jsou vedené v jednom vlákně. Výhodou je využití vícevidového optického vlákna, ovšem poté nastává problematika při sestavení interferenčního obrazce. Zástupcem je zde Fabry-Perotův interferometr. [28]

#### 3.4 Michelsonův interferometr

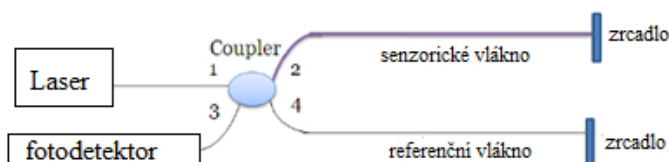
V roce 1881 byl vynalezen americkým fyzikem Albertem A. Michelsonem. V té době sloužilo jeho zařízení k dokázání světelného éteru, což se mu povedlo o šest let později s E. Morleyem. Michelson interferometrem měřil i přesnější délky objektů. Dnes se Michelsonův interferometr využívá na přesná měření vlnových délek, ke zjištění velice krátkých vzdáleností, u nichž je potřeba znát vlnovou délku světla při měření v interferometru.

Dvousvazkový Michelsonův interferometr se skládá ze dvou zrcadel, kompenzační destičky, polopropustné skleněné destičky, zdroje záření (laser), detektoru, kterým se měří výsledná intenzita paprsku. Koherentní záření je v našem případě laser. Laser dopadá pod úhlem 45 stupňů na polopropustnou destičku, kde dochází k rozložení paprsku na dva. První paprsek se odráží kolmo na zrcadlo  $Z_1$ , u kterého nastává totální odraz zpět na polopropustnou destičku, tam se opět láme a prochází na detektor či na stínítko. Mezi zrcadlo a polopropustnou destičku se vkládá do cesty paprsku kompenzační destička, aby došlo u obou paprsků ke stejnému počtu průchodu těmito tělesy. Druhý paprsek se láme a dopadá kolmo na zrcadlo  $Z_2$ , které ho vrací do bodu A. V bodě A se paprsek odráží do detektoru. Tam se sebou oba paprsky interferují a navzájem se zesilují nebo zeslabují. Jestliže paprsky urazí stejnou dráhu, bude mezi nimi fázový rozdíl konstantní, tudíž se budou zesilovat. Pokud zrcadla  $Z_1$  a  $Z_2$  nebudou stejně vzdálená od polopropustné destičky, vzniknou rozdílné dráhy paprsků, které musí urazit. V závislosti na rozdílné dráze vznikají interferenční maxima a minima. [29]



Obrázek 3.1: Michelsonův zrcadlový interferometr

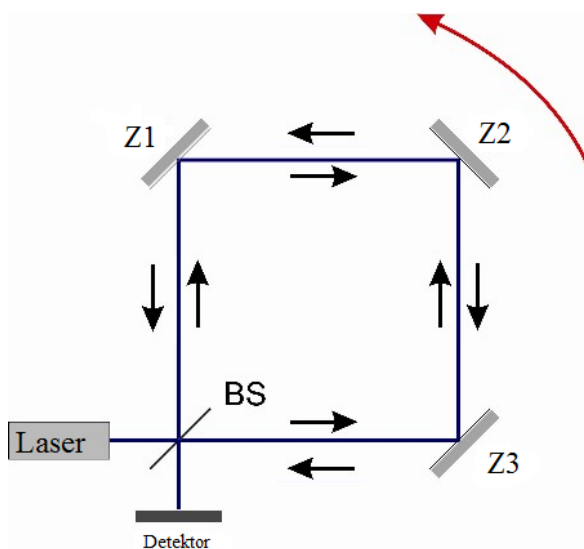
Vláknový interferometr funguje na velmi podobném principu. Vstupní paprsek je rozdělen couplerem 2x2 do dvou ramen, referenčního a senzorového. Na senzorové rameno působí snímaná veličina. Paprsky se v obou ramenech odrazí pomocí použitých zrcadel do coupleru. Zde dochází k interferenci dvou paprsků, kterou zachytí fotodetektor. Fázové změny se měří porovnáváním současného signálu s předchozími signály uloženými v paměti. Michelsonův interferometr umožňuje používat NxN couplery, díky kterým vzniká více optických cest, a tím je mnohem citlivější než jakýkoliv dvojramenný interferometr. [30]



Obrázek 3.2: Vláknově optické provedení interferometru

### 3.5 Sagnacův interferometr

Roku 1913 byl sestaven Francouzem Georgesem Sagnacem, po němž je také jeho vynález pojmenován. Sagnacův interferometr je spojen s dokazováním Sagnacova efektu, který souvisí s teorií relativity, jehož základem je kruhová dráha paprsku. Tvar kruhu u zrcadlového interferometru zde symbolizují tři zrcadla a jedna polopropustná destička. Tyto prvky jsou rozmístěny do čtverce.

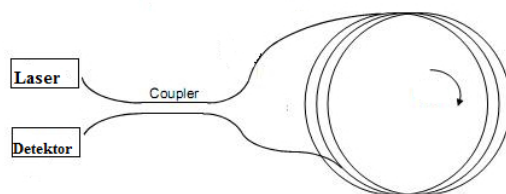


Obrázek 3.3: Sagnacův interferometr

Paprsek z laseru dopadá na polopropustnou destičku BS, kde se láme na dva svazky. Oba dva paprsky se budou pohybovat proti sobě. První paprsek dopadající na zrcadlo Z1 se pohybuje po směru hodinových ručiček a po dalších odrazech od zrcadel Z2 a Z3 prochází do detektoru. Naopak druhý paprsek dopadá na zrcadlo Z3 a šíří se proti směru hodinových ručiček až do detektoru, kde spolu interferují. Výsledný paprsek se zesílí, jelikož paprsky urazily stejnou dráhu s konstantním fázovým

rozdílem. Pokud je však interferometr v pohybu a začne se otáčet kolem své osy, dochází k fázovému posunu u obou paprsků. Jelikož paprsek šířící se ve směru otáčení urazí menší vzdálenost oproti paprsku v opačném směru. [31]

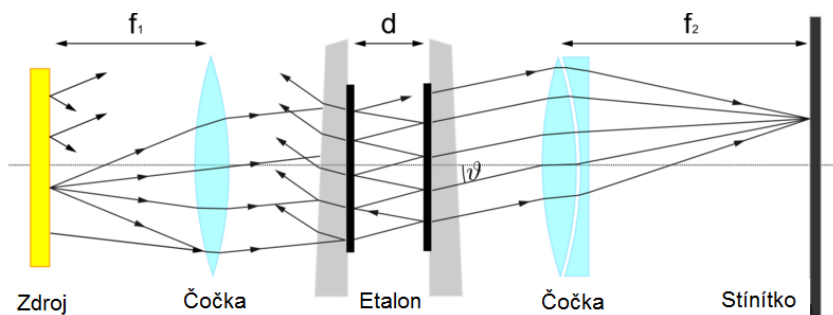
Vláknový Sagnacův interferometr využívá jednomódový polovodičový koherentní zdroj nebo erbiem dopovaný vláknový laser. Kolimovaný laserový paprsek s jednotnou fází vstupuje do bezztrátového 3dB coupleru, který ho rozdělí na dva paprsky se stejnou intenzitou. Každý paprsek cestuje jednovidovým vláknem cívky v opačném směru. Na coupleru jsou spolu oba paprsky spojeny. Výstupní interferující paprsky jsou vedeny směrem k jedinému detektoru. Své využití našel hlavně pro otáčivé snímání. U neotáčejícího se Sagnacova intrefeometru mají oba módy stejnou fázi, zatímco u otáčivého Sagnacova intrefeometru se vzhledem k velikosti otáčení mění optická cesta a také fáze. Interferenční spektrum závisí na úhlové frekvenci. Fázový rozdíl mezi oběma módy je vypočítán rovnicí 3.4 viz výše. Sagnacův vláknový interferometr je používán pro snímání časově proměnlivých jevů a slouží k detekci proudu, zvukových vln, úhlové rychlosti a napětí teploty. Dále je využívám k sestavení optického gyroskopu. [32]



Obrázek 3.4: Sagnacův vláknový interferometr

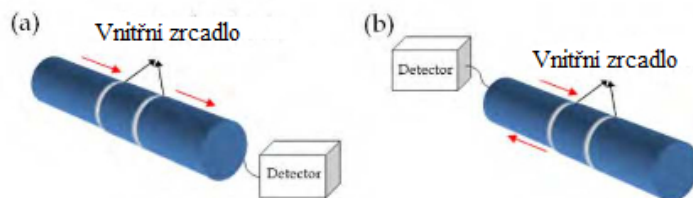
### 3.6 Fabry-Perotův interferometr

Fabry-Perotův interferometr byl sestaven roku 1899 C. Fabrym a A. Perotem. Jedná se o zařízení s jedním ramenem, jež pracuje na principu mnohonásobné interference, na které se podílí mnoho paprsků. Paprsky navíc interferují mezi sebou na dvojici polopropustných desek. Obě desky vymezují vzduchovou vrstvu. Paprsky se při průchodu každou deskou částečně odráží a částečně prochází dál. Pomocí spojné čočky jsou prošlé paprsky z polopropustných desek přivedeny k interferenci, kterou je možné sledovat na stínítku v podobě interferenčních maxim a minim. Fázový rozdíl paprsků závisí na vzdálenosti mezi deskami  $d$  a také na úhlu, pod kterým dopadají na desku. Pro velkou citlivost se využívá hlavně v astronomii u spektroskopu. [33; 34; 35]



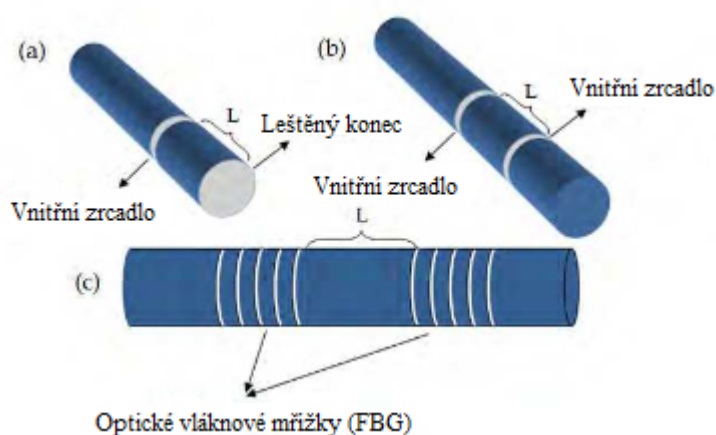
Obrázek 3.5: Fabry-Perotův interferometr

Vláknový Fabry-Perotův (FP) interferometr se skládá ze dvou opticky paralelních odrazových skel, které jsou od sebe odděleny dutinou. Odrazové prvky mohou být zrcadla, rozhraní dvou dielektrik nebo mohou být reprezentovány pomocí mřížek (Fibre Bragg Gratings). Dutina může být jiné optické vlákno nebo jiná látka, která vede světlo. Dva rozdílné FP interferometry jsou znázorněny na obrázku 3.6.



Obrázek 3.6: (a) Fabry-Perotův interferometr založený na přenosu prošlého světla (b) Fabry-Perotův interferometr založený na odrazu světla.

Odražené a prošlé spektrum závisí na délce dutiny, indexu lomu a na odrazivosti zrcadel. Ze zákona zachování energie platí, že přenášené spektrum je opačné oproti odraženému spektru. Vláknový FP interferometry můžeme rozdělovat na vnitřní a vnější. U vnitřního vláknového optického FP interferometru (IFFPI) jsou obě zrcadla odděleny jednomódovým vláknem, zatímco u vnějšího (EFFPI) jsou zrcadla odděleny vzduchovou mezerou nebo jiným materiálem než vláknem. U obou typů, mimo oblasti se zrcadly se využívá k přenosu jednomódové vlákno. Obr. 3.7 ukazuje konstrukci tří typů IFFPI. (a) Jeden konec vlákna je leštěný, a proto má podobné vlastnosti jako zrcadlo. Pro vyšší odraz může být leštěný konec pokryt přechodnými dielektrickými vrstvami. Vnitřní zrcadlo je reprezentováno pomocí sestřihu leštěného vlákna nebo pomocí pokrytého leštěného vlákna. (b) využívá obě vnitřní zrcadla. (c) využívá FBG odrazy. [32]



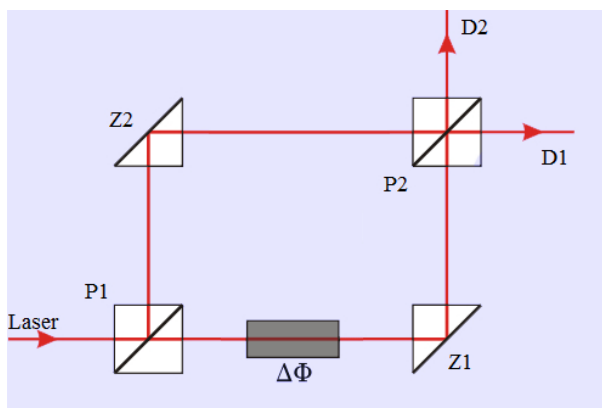
Obrázek 3.7: Konstrukční typy IFFPI

## 4 Mach-Zehnderův interferometr

### 4.1 Obecný popis Mach-Zehnderova interferometru

Mach-Zehnderův interferometr byl sestaven mezi lety 1891 a 1892. Podíl na jeho vzniku mají Ernest Mach, jeho syn Ludwig a Švýcar Ludwig Zehnder. V současnosti je využit v širokém spektru aplikací. Na rozdíl od Michelsonova interferometru není tak citlivý, ale má příznivý měřicí prostor, který je pro naše měření požadován. Výhodou je, že oba paprsky opustí interferometr a dojdou až na výstup, ovšem u Michelsonova jedna z výstupních vln směřuje ke zdroji. Následkem toho může dojít k rušení světelného zdroje, pokud jím je laser, čímž vzniká změna intenzity nebo fáze. Také je mnohem odolnější vůči rušivým vlivům prostředí. Využívá se pro detekci a ke studii různých větrných a tepelných toků, k měření tlaku, hustoty a změny teploty v plynech.

Zrcadlový interferometr se skládá ze dvou děličů svazku (dělicí poměr může být proměnný), dvou zrcadel, dvou detektorů na výstupu. Vstupní paprsek (laser) je rozdělen prvním děličem (P1) na dva svazky do dvou ramen (svazek referenční a předmětný), která jsou na sobě nezávislá. Do cesty předmětného paprsku se vkládá měřený objekt ovlivňující jeho optickou dráhu. U takového paprsku vzniká fázový posun. Oba svazky se po odrazu od zrcadel opět setkávají na druhém děliči (P2), kde na detektorech (D1 a D2) lze měřit jejich vzájemnou interferenci. [36; 37; 38]



Obrázek 4.1: Zrcadlový Mach-Zehnderův interferometr

Rozdíl optické dráhy vypočteme ze vztahu:

$$\Delta p = (\lambda/2\pi) \Delta\varphi \quad (4.1)$$

kde  $\Delta\varphi$  fázový posun jehož vztah je uveden výše. Na základě známe hodnoty fázového posunu lze také spočítat zpoždění jednoho svazku oproti druhému:

$$\tau = (\lambda/2\pi)\Delta\varphi = \Delta p/c \quad (4.2)$$

Nejvyšší intenzitu interference, kterou lze pozorovat na stínítku vypočteme:

$$I_{max} = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \quad (4.3)$$

pokud platí  $\Delta\varphi = 2m\pi$  nebo  $\Delta p = m\lambda$ , kde  $m$  je celé číslo.

Pro minimální intenzitu je vztah pro výpočet:

$$I_{min} = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \quad (4.4)$$

pokud platí  $\Delta\phi = (2m + 1)\pi$ ,  $\Delta p = (2m + 1)\lambda/2$ .

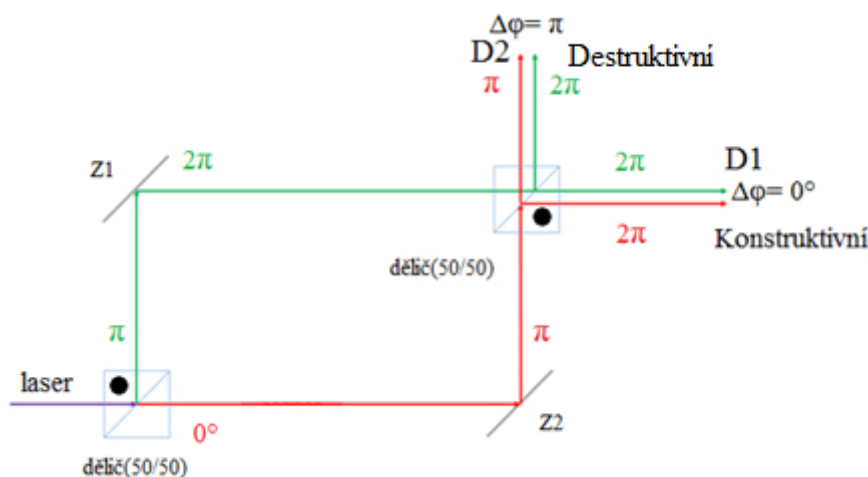
Vizibilita neboli kontrast pro daný interferometr:

$$V = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min}) \quad (4.5)$$

kteřá má hodnotu od 0 do 1. Po úpravě dostáváme [39]:

$$V = 2(I_1 I_2)^{1/2} / (I_1 + I_2) \quad (4.6)$$

Jestliže použijeme děliče svazku rozdělující svazek rovnoměrně 50%/50%. Poté na prvním děliči dochází při odrazu k fázovému posunu  $\pi$  a k lomu paprsku bez změny fáze. Oba paprsky se po odrazu od zrcadel fázově mění o  $\pi$ . Na druhém obráceném děliči se paprsky setkávají a interferují. Jelikož paprsek procházející dolním ramenem se odráží od děliče, fázově se mění o  $\pi$ , lze měřit na detektoru D1 konstruktivní a na detektoru D2 destruktivní interferenci. [40]



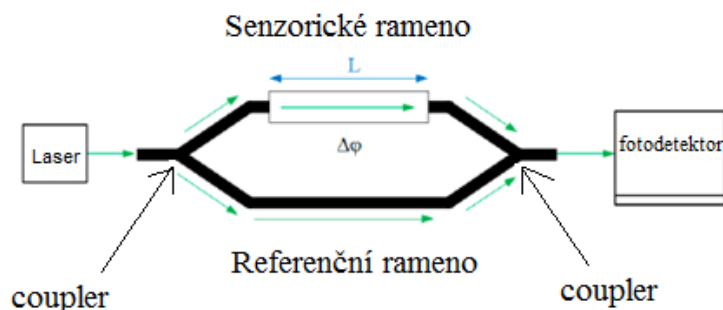
Obrázek 4.2: Mach-Zehnderův interferometr s odrazem 180°

## 4.2 Vláknově optický Mach-Zehnderův interferometr

Průmyslově se dnes využívá vláknový Mach-Zehnderův interferometr (MZI) s jednomódovým vláknem, které jsou velmi citlivé na interferenční efekt. Jednodušeji lze kontrolovat rozdíl optických cest s vysokou přesností. Oproti zrcadlové variantě jsou zde obě ramena nahrazena dvěma jednomódovými vlákny s vlnovými děliči (coupler). Vstupující svazek je nejprve rozdělen couplerem do dvou ramen. Jedno z ramen je referenční, které musí být chráněné proti vnějším vlivům. Poté druhé z ramen je senzorové, které je vystaveno vnějším vlivům pro účely měření. Dále oba svazky (ramena) jsou spojeny druhým couplerem. Světlo vzniklé spojením obou ramen je interferenční a má podobu

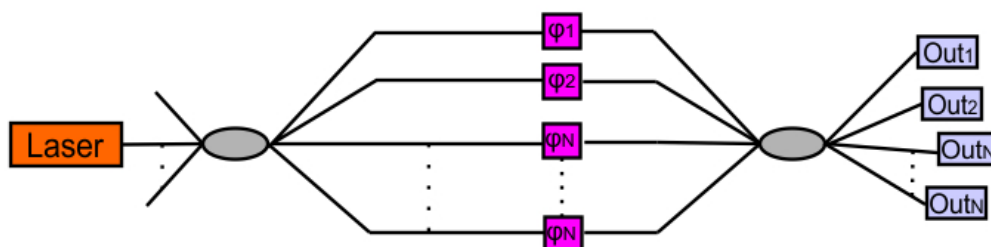


na základě rozdílu optické trasy obou ramen vyvolané daným měřením. Výslednou interferenci zachytí fotodetektory vyhodnocující fázový posun. Fázový posun mezi ramenem referenčním a měřícím je popsán rovnicí 3.6 výše.



Obrázek 4.3: Vláknový Mach-Zehnderův interferometr

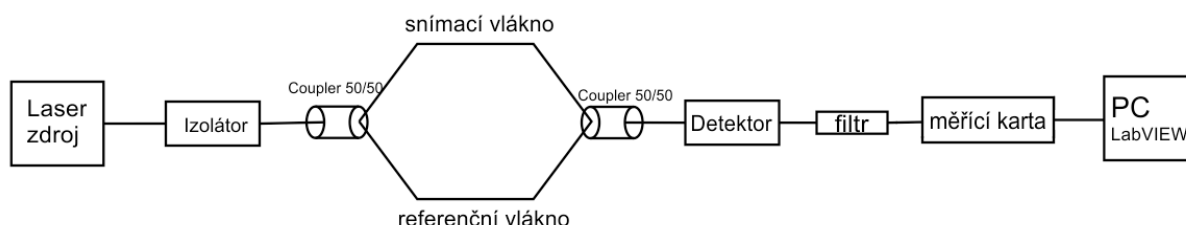
U MZI je možno využít NxN coupler podporující větší množství optických cest. Každý takový bezetrátový lineární coupler je potom popsán maticí NxN. Například komerčně bývá dostupný třicestný interferometr s 3x3 couplerem. Jak už bylo napsáno výše u Michelsonova interferometru, vícecestné zařízení mají mnohem lepší schopnost odhalovat změny oproti dvojramenným konstrukcím. [32; 41]



Obrázek 4.4: N-cestný Mach-Zehnderův interferometr

## 5 Sestavení prototypu vláknově optického Mach-Zehnerova interferometru

Pro praktickou část této bakalářské práce byl zvolen optický vláknový Mach-Zehnderův interferometr, který poslouží k měření. Nejprve je potřeba jej sestavit z několika prvků a přizpůsobit našemu měření vibrací. Sestavené zařízení začíná vstupním laserem od firmy EXFO. Sestava pokračuje izolátorem, který zabraňuje průchod odraženým paprskům směrem k laseru. Dále navazuje coupler rozdělující světlo do dvou optických vláken. Obě vlákna jsou pomocí dalšího coupleru spojena. Na výstupu coupleru je připojen detektor zaznamenávající interferenci. Zde se signál mění na analogový. Poté jsou filtrem propouštěny k měřicí kartě jen vysoké frekvence. Pomocí této karty je signál zpracován pro PC, kde konečná analýza všech výsledků bude probíhat pomocí programu LabVIEW. Schéma zařízení je uvedeno na obrázku 5.1. Níže jsou prvky zařízení popsány detailněji.



Obrázek 5.1: Schéma sestavy vláknově optického Mach-Zehnderova interferometru

### 5.1 Laserový zdroj (EXFO FLS 2600B)

Jako zdroj poslouží kalibrační přístroj EXFO FLS 2600B, který využívá vláknový laser s erbiem zaručující velkou přesnost vlnové délky pro toto měření. Vlnovou délku lze ladit v rozmezí 1510 nm až 1612 nm. Výstupní výkon je větší než 0 dBm přes kritické oblasti 1515 nm a 1610 nm. Má dva porty, monitorovací výstupní port a hlavní výstup. Monitorovací výstupní port měří vlnovou délku v reálném čase. Hlavní výstup je upraven výstupním výkonem v rozsahu 10 dB. [42]



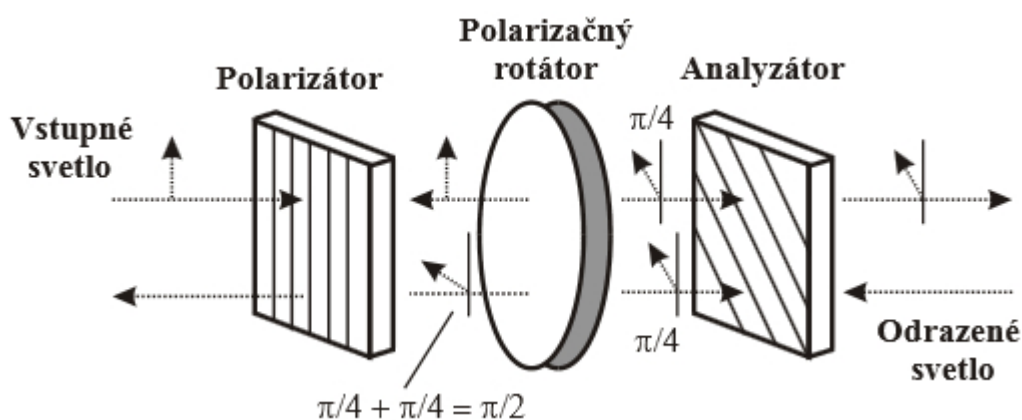
Obrázek 5.2: EXFO FLS 2600B, převzato z [42]

## 5.2 Izolátor

Optický izolátor zabraňuje průchodu vracejícím se neboli odraženým paprskům zpět k laseru. Funguje na principu Faradayova rotátoru, který vlivem magnetického pole mění polarizační rovinu lineárně polarizovaného světla právě o  $45^\circ (\pi/4)$ . Jak velké stočení  $\theta$  nastane, závisí na Verdetově konstantě, délce  $L$  rotátoru a intenzitě magnetického pole  $H$ . [43; 44]

$$\theta = VLH \quad (5.1)$$

Verdetova konstanta závisí na daném materiálu, a proto také na vlnové délce světla. Nejčastěji se využívá terbium pro velkou hodnotu Verdetovy konstanty. Při sestrojení izolátoru je potřeba kromě Faradayova rotátoru i navíc vstupní polarizátor, který má za úkol odfiltrovat odražené paprsky s polarizační rovinou posunutou o  $90^\circ (2 \times 45^\circ, \pi/2)$ . [43; 44]



Obrázek 5.3: Princip optického izolátoru, převzato z [44]

## 5.3 Coupler 50/50

Coupler je optický pasivní prvek sloužící k rozdělení vstupního optického výkonu do několika vláken, anebo ke sjednocení výkonu z více vláken. Obvykle se používá konfigurace 1x2. Obsahuje jeden vstup a dva výstupy s nastavitelným dělicím poměrem podle potřeby. Coupler je nezávislý na přenášených rychlostech a protokolu, jen vyžaduje použít správný typ vlákna. Lze použít jednovidové vlákno 9/125 $\mu\text{m}$ , vícevidové vlákno 50/125 $\mu\text{m}$  nebo 62,5/125 $\mu\text{m}$ . Nejčastější varianty couplerů pracují s vlnovými délkami 1310 nm a 1550 nm. Pro účely tohoto měření bude využit coupler 1x2 s dělicím poměrem 50/50 dělící výkon rovnoměrně do dvou vláken. [45; 46]



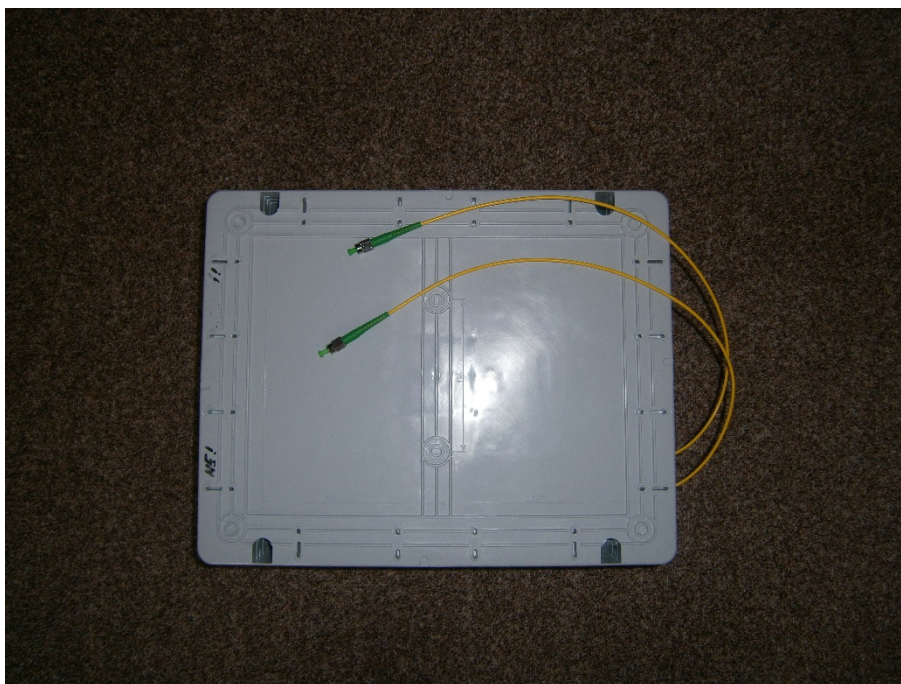
Obrázek 5.4: *Coupler 1x2, převzato z [45]*



Obrázek 5.5: *Coupler 2x2, převzato z [46]*

## 5.4 Realizace referenční a senzorické části MZI

Referenční a senzorická část (ramena) je reprezentována jednořadovými optickými vlákny. Obě ramena jsou uložena v šedé umělohmotné krabici o rozměrech 40 x 30,5 x 13 cm. Uvnitř krabice se nachází polystyrenové pouzdro sloužící pro uložení referenčního vlákna. Pouzdro má za cíl tlumit vibrace, které jsou vnímány jen pomocí senzorické části. Vlivem vibrací vzniká fázový posun senzorické vlny oproti referenční.



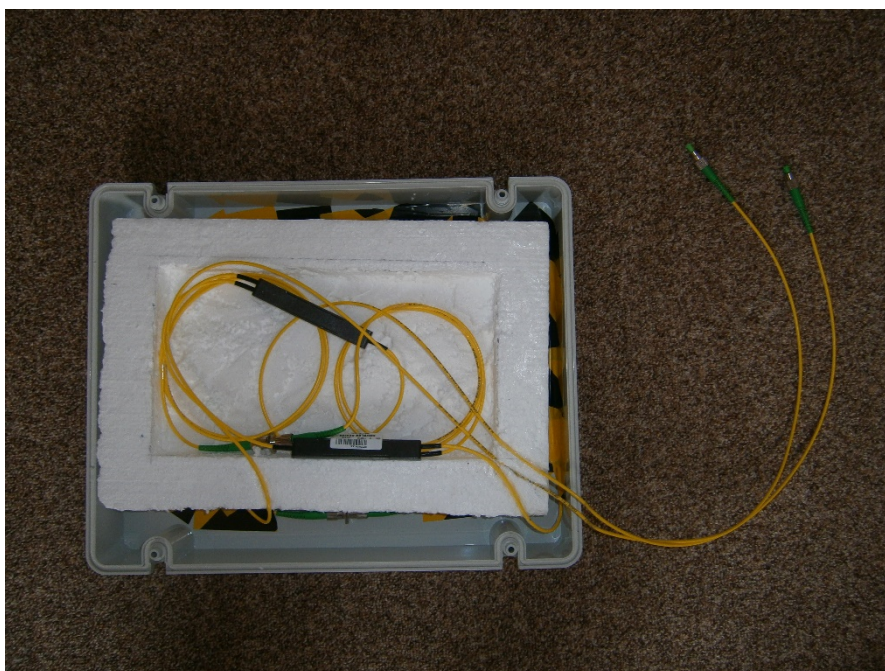
Obrázek 5.6: *Složený Mach-Zehnderův interferometr obsahující referenční a senzorické rameno uvnitř šedé krabice*





Obrázek 5.7: *Realizace senzorického neboli měřícího ramene*

Senzorické vlákno - jedná se o optické vlákno, které je pomocí lepicí pásky přichyceno ke spodní části umělohmotné krabice vnímající vibrace. Vlivem vibrací je modulováno šíření paprsku ve vlákně, kde vzniká fázový posun.



Obrázek 5.8: *Realizace referenčního ramene*

Referenční optické vlákno je uloženo v polystyrenovém pouzdru skládající se ze dvou částí, každá o tloušťce 5cm. Obě části se k sobě přiklopí a následně tvoří ochranné pouzdro. Pouzdro má za úkol chránit senzor před vnějšími vlivy a použitý materiál dobře vede vibrační odezvu, tedy nižší frekvence. Na obrázku lze vidět i dva vazební členy (couplery), které jsou také uloženy v pouzdře. Kdyby couplery nebyly vsazeny do pouzdra, bylo by velmi obtížné izolovat konce referenčního vlákna při konstrukci couplerů. Celkem byly sestavené 3 verze zařízení, kdy až 3. verze dosahovala ideální citlivosti a frekvenčního rozsahu pro schopnost detekce vibrační odezvy od testovaných objektů. Předchozí sestavené verze nebyly dostatečně citlivé pro toto měření. Bylo zapotřebí lépe uchytit a umístit snímané vlákno. Také byla navýšena tloušťka polystyrenového pouzdra z 2 cm na 5 cm.

## 5.5 Fotodetektor PDA20H-EC thorlabs

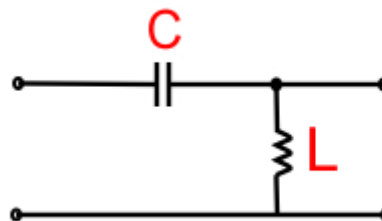
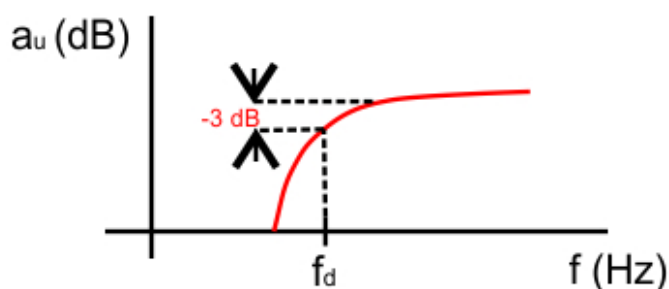
- PbSe- detekční prvky jsou vyrobeny z olova a selenu.
- Vlastní zesílení
- Vstupní napětí až  $\pm 10$  V
- Šířka pásma 10 kHz
- Rozsah vlnových délek 1500-4800 nm.
- Napájení 230 V [47]



Obrázek 5.9: Fotodetektor PDA20H-EC, převzato z [47]

## 5.6 Filtr- LC High Pass Filter (Horní propust)

Filtr s horní frekvenční propustností využívá k odfiltrování stejnosměrné složky LC obvod skládající se z kondenzátoru a z cívky. Takový filtr slouží k odfiltrování nežádoucích nízkých frekvencí v řádu Hz a k propouštění vysokých frekvencí až po hodnotu  $f_d$  (dolní frekvence), kterou si zvolíme. V našem případě je hodnota  $f_d$  8 Hz. Při  $f_d$  dochází k hlavnímu zlomu frekvenční propustnosti, která nastává při poklesu o 3 dB od lineární části frekvenční charakteristiky. Z obrázku 5.10 vyplývá, že v praxi nedochází k úplnému potlačení frekvencí pod bodem  $f_d$ . Podobné frekvence k  $f_d$  jsou filtrem potlačovány méně. [48]



Obrázek 5.10: Frekvenční charakteristika horní propustnosti Obrázek 5.11: LC horní propust

## 5.7 Měřicí karta- NI USB- 6210

Měřicí karta slouží jako hardwarové zařízení ke sběru dat pro PC. Karta má danou specifikaci:

- 16 analogových vstupů (16-bit, 250 kS/s)
- 4 digitální vstupy a 4 digitální vstupy, dva 32bit čítače
- napájený USB pro vysokou mobilitu, vestavěné připojení signálů
- Kompatibilita s LabVIEW, LabWindows / CVI a Measurement Studio for Visual Studio .NET
- vysokorychlostní datový přenos NI signálu přes USB [49]



Obrázek 5.12: Měřicí karta NIUSB-6210, převzato z [49]

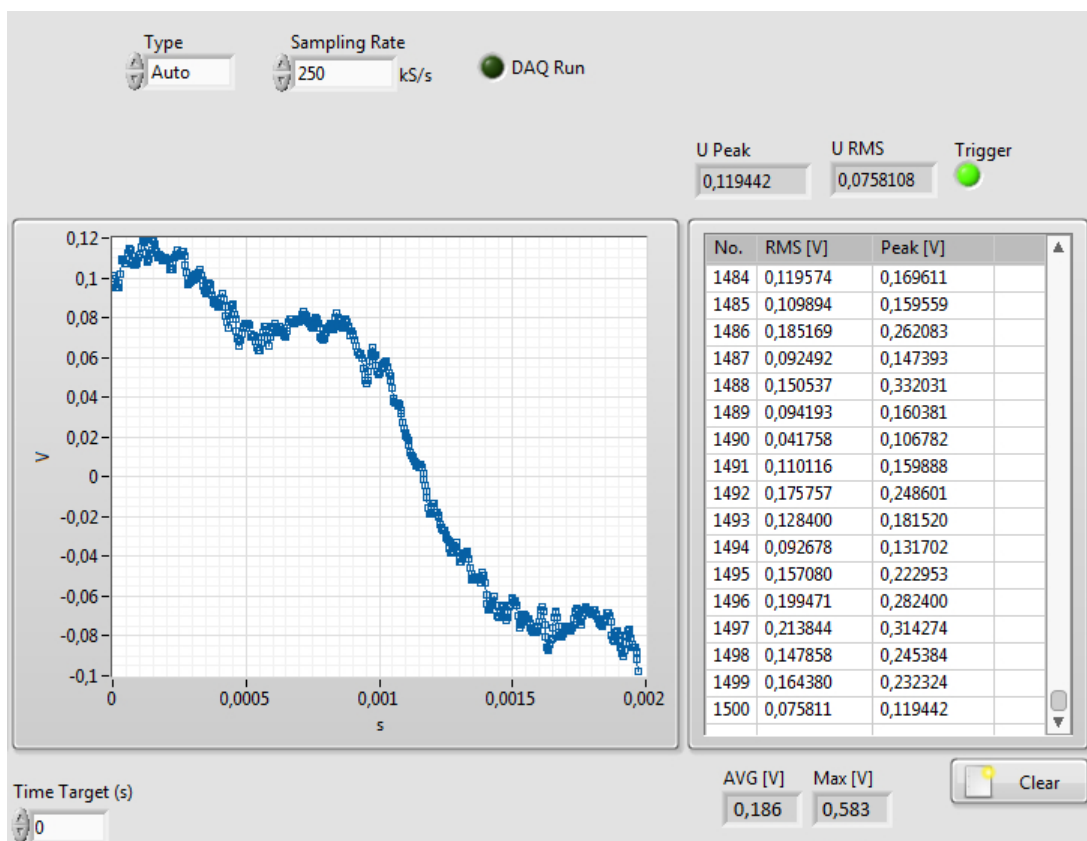
## 5.8 PC - LabVIEW

Analýza signálu proběhne na PC pomocí softwaru LabVIEW a vytvořené aplikace, která využívá FFT algoritmy (FAST FOURIER TRANSFORM) pro výpočet diskrétní Fourierovy transformace. FFT provádí menší počet kroků, což má za následek zrychlení celého procesu. FT je integrální transformace, určená pro lineární zpracování signálu. Umožňuje frekvenční analýzu spektra daného signálu. Převádí periodický signál z časové oblasti  $f(t)$  do frekvenční oblasti  $F(\omega)$  nebo i naopak. [50]

Ke zpracování signálu naměřeného pomocí Mach-Zehnderova interferometru byl využit software od firmy National Instruments LabView Signal Express 2013. Měřicí karta National Instruments USB-6210 je od stejné firmy, tudíž jsou spolu plně kompatibilní. Měřicí karta plní roli A/D převodníku a zesilovače, tedy převádí analogový signál, který je výstupem fotodetektoru na digitální signál. Digitální signál je poté možno zpracovávat v PC. Použitá aplikace v LabView zobrazuje průběh zachyceného signálu ve formě napětí v závislosti na čase (amplitudová spektra vstupního signálu) a v podobě amplitudově frekvenčního spektra.

## 6 Měření šumového pozadí Mach- Zehnderova interferometru

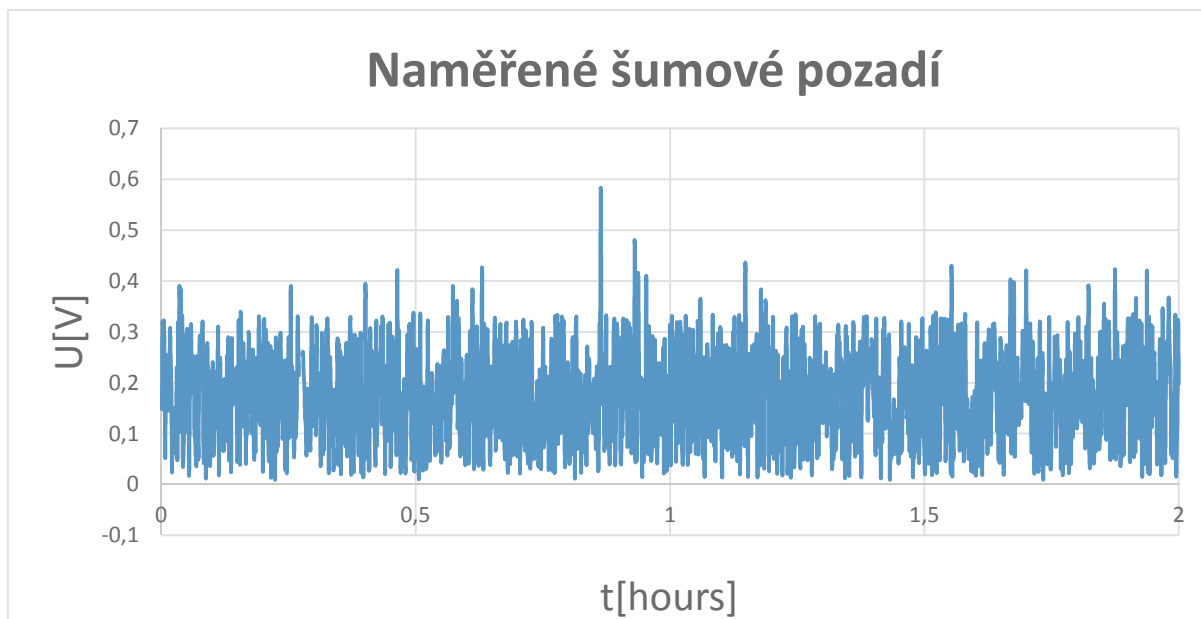
Nejdříve bylo nutné provést měření šumového pozadí Mach-Zehnderova interferometru. Celkem bylo provedeno měření s 1500 opakováním, kdy aplikace LabView po dobu 2h zaznamenávala maximální hodnoty amplitudových spekter (celkem 1500 hodnot), které lze pozorovat v grafické podobě na obrázku 6.2. Tyto hodnoty amplitud [V] byly způsobeny nežádoucími interferencemi zapříčiněné různými fyzikálními veličinami, jako je například vítr, hluk atd.. Na základě průměru těchto maximálních amplitud naměřených hodnot byla vypočtena horní hranice šumového pozadí = 0,186 V. Hodnota reprezentující dostatečnou úroveň odstupe signálu od šumu (SNR) byla stanovena na 0,3 V.



Obrázek 6.1: Ukázka z měření šumového prostředí

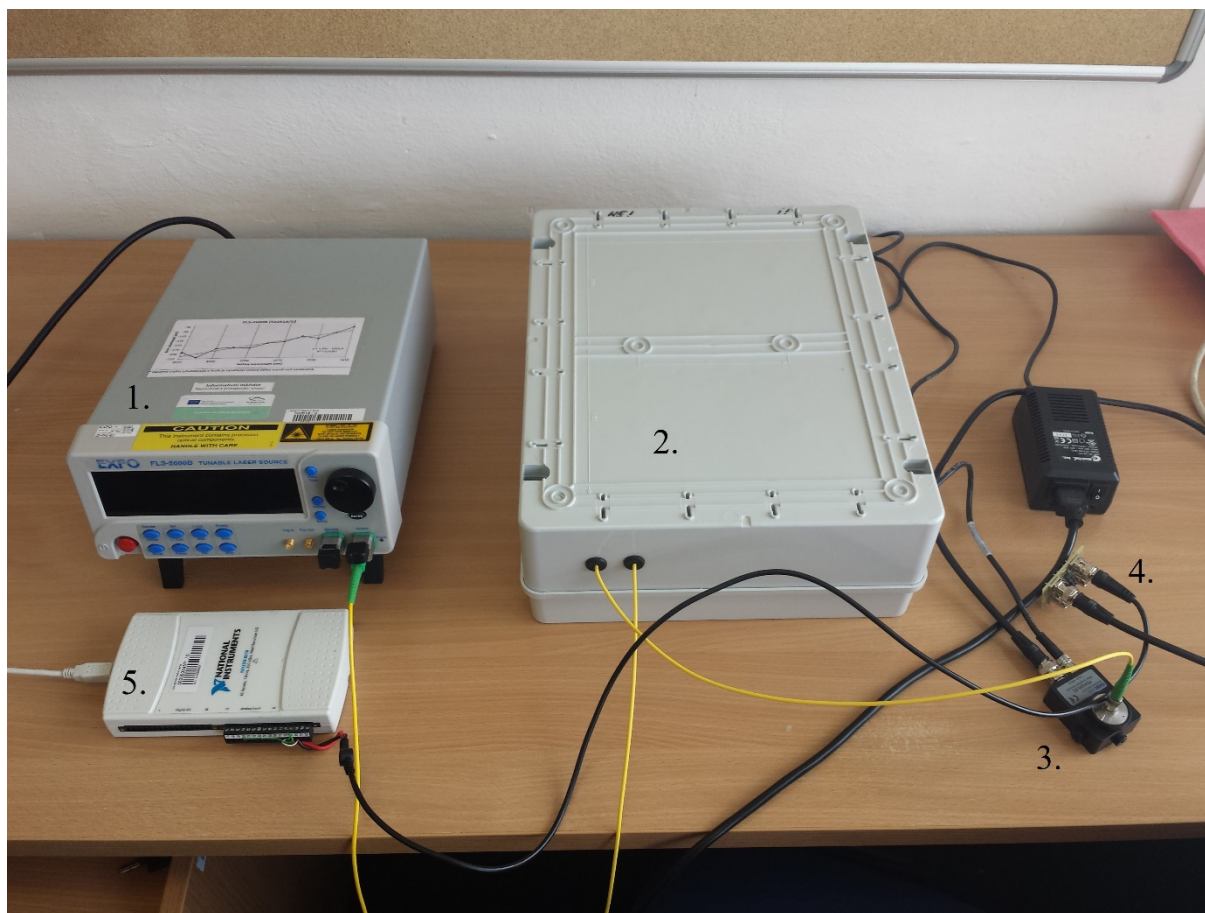
Na obrázku 6.1 se nachází graf, jenž zobrazuje jednotlivé maximální detekované průběhy amplitudových spekter. Vzorkovací frekvence byla 250 kS/s. Ve sloupci napravo najdeme 1500 naměřených maximálních amplitud nežádoucích interferencí. Pod těmito údaji je uvedena průměrná hodnota maximálních amplitud nežádoucích interferencí (AVG [V] = 0,186).





Obrázek 6.2: *Naměřené šumové pozadí pomocí M-Z interferometru*

Obrázek 6.2 (graf) reprezentuje 1500 maximálních hodnot amplitudových spekter. Přibližně každá hodnota uvedena v grafu odpovídá nejvyšší hodnotě, která byla naměřena po dobu 5s. Největší výchylka amplitudy byla zaznamenána zhruba v 50. minutě měření hodnotou 0,583 V. Průměrná hodnota amplitud se rovná 0,186 V.

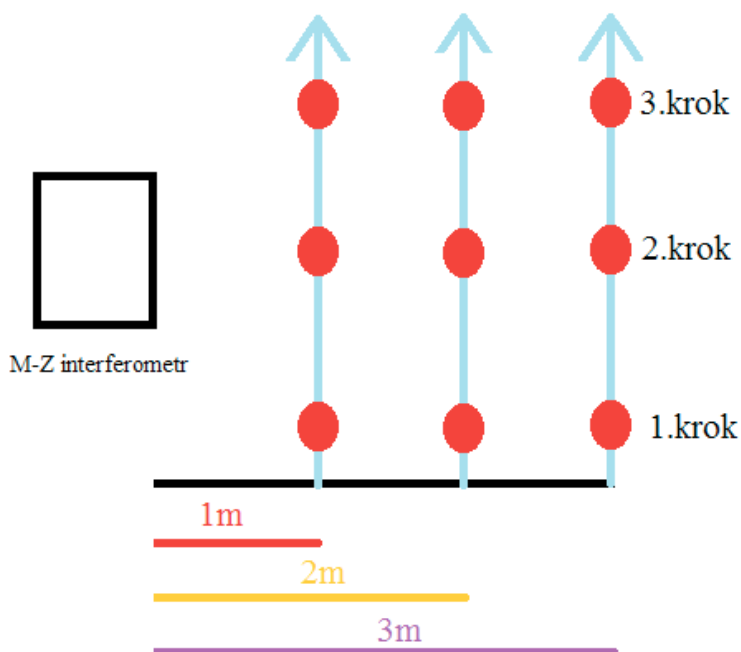


Obrázek 6.3: Sestava pro měření šumového pozadí

Sestava vyobrazena na obrázku 6.3 se skládá z vytvořeného senzoru (MZI(2.)), z něhož vedou dva žluté optické vývody. Jeden je pro vstup laseru (1.) a druhý je výstup směřující k detektoru (3.). Z detektoru je signál veden do měřicí karty (5.), než však dojde k měřicí kartě, musí projít filtrem (4.). Nakonec signál končí v počítači, kde jej vyhodnocujeme.

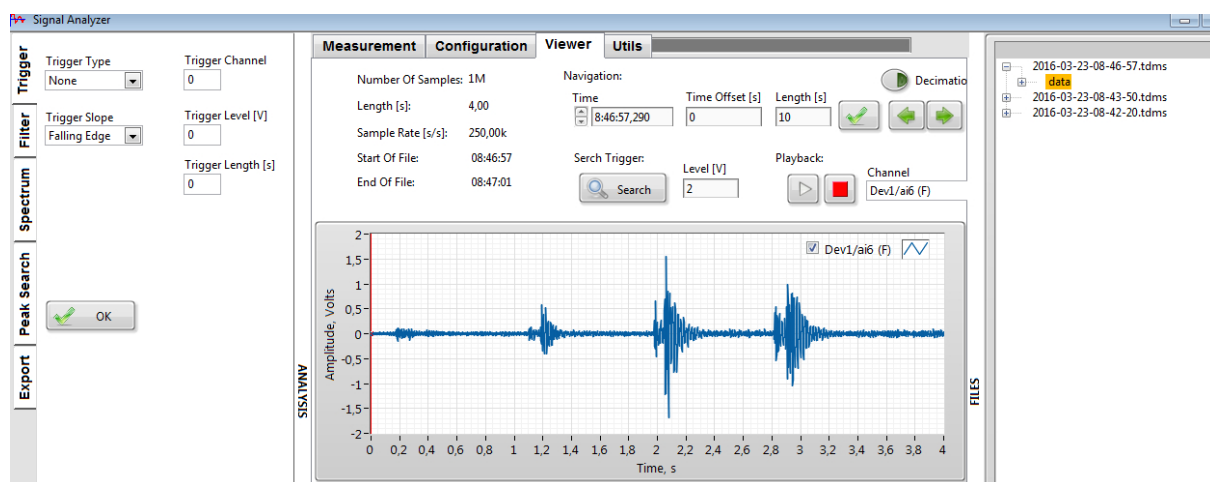
## 7 Měření vibrací vyvolaných různými testovacími osobami

Měření vibrací proběhlo za pomoci Mach- Zehnderova interferometru v sestavě jako na obrázku 6.3. Zařízení bylo umístěno na podlaze v budově v různých vzdálenostech od zdroje (osob). Celkem proběhlo 150 měření. Níže jsou uvedeny typické záznamy od 5 testovacích osob a to vždy ve vzdálenosti 1, 2 a 3m od senzoru. Trajektorie osob je znázorněna na obrázku 7.1. Každá jednotlivá chůze se skládá celkově z 3 kroků. Vše bylo zaznamenáno a graficky zobrazeno programem LabView. Jelikož z předchozího měření šumového pozadí byla stanovena dostatečná úroveň odstupu signálu od šumu na 0,3 V, tak každá velikost amplitudy nad touto hodnotou je vnímaná jako pohyb testovacích osob (krok).



Obrázek 7.1: Trajektorie testovacích osob

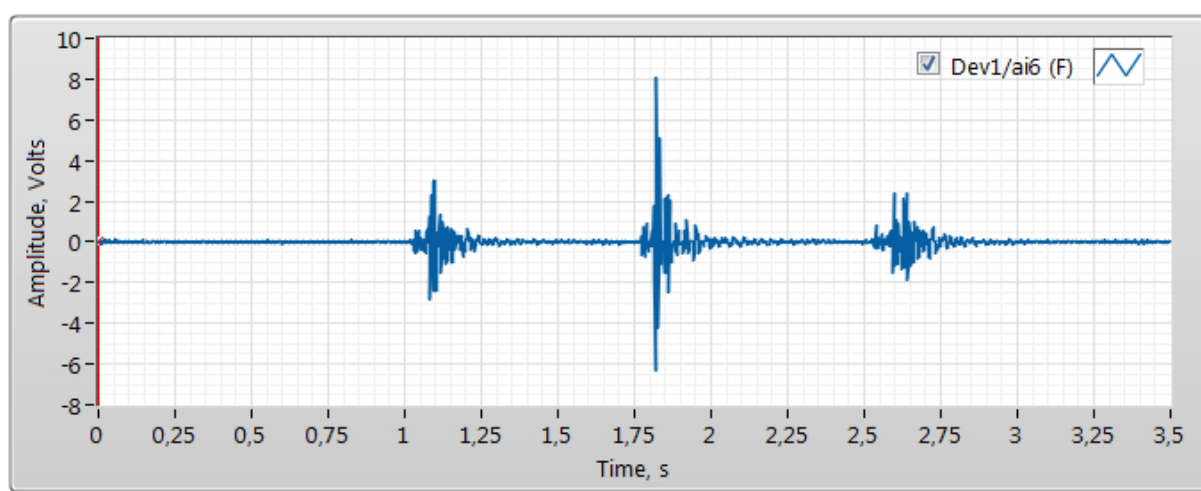
Na obrázku 7.1 lze vidět trajektorii chůze testovacích osob ve třech různých vzdálenostech (1m, 2m, 3m). Každé osobě přísluší tři měření. Červené body charakterizují došlap chodidla na podlahu, jenž bylo celkem tři.



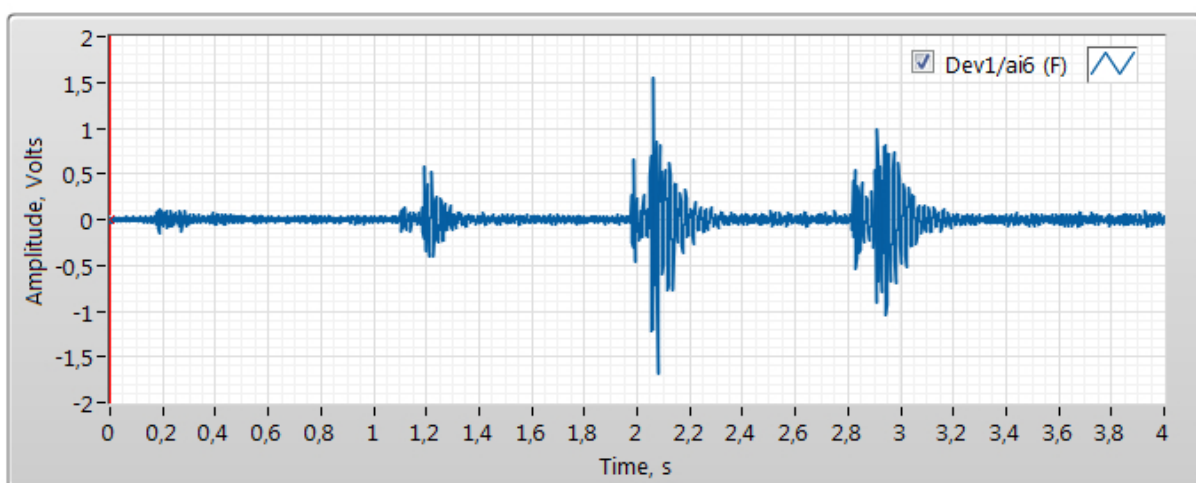
Obrázek 7.2: *Náhled z měření ze softwaru LabView*

Uprostřed obrázku 7.2 se nachází amplitudové spektrum v závislosti na čase. Na svislé ose se nachází amplituda [V] a na vodorovné ose čas [s] s celkovým rozsahem 4s. Na první pohled si lze všimnout zvýšené amplitudy ve třech časových okamžicích. V každém takovém časovém okamžiku má amplituda vyšší hodnotu než 0,3 V, což je větší jako stanovená dostatečná úroveň od šumu. Poté každá taková amplituda odpovídá došlápnutí chodidla na podlahu. Při došlápnutí došlo k detekování vibrační odezvy od testovacích osob pomocí sestaveného senzoru. Z obrázku je patrné, že došlo celkem ke třem došlápnutí neboli třem krokům. Podle nejvyšší amplitudy lze rozpoznat, jaké došlápnutí bylo nejbližší interferometru. V tomto případě je to druhé došlápnutí (krok) s hodnotou amplitudy 1,55 V, jak vyplývá i z obrázku 7.1, kdy 2. krok je nejbližší k měřicímu přístroji. Ne vždy tomu tak je. Stane tak pouze v případě, pokud by došlápnutí byla stejně silná nebo alespoň velice podobná.

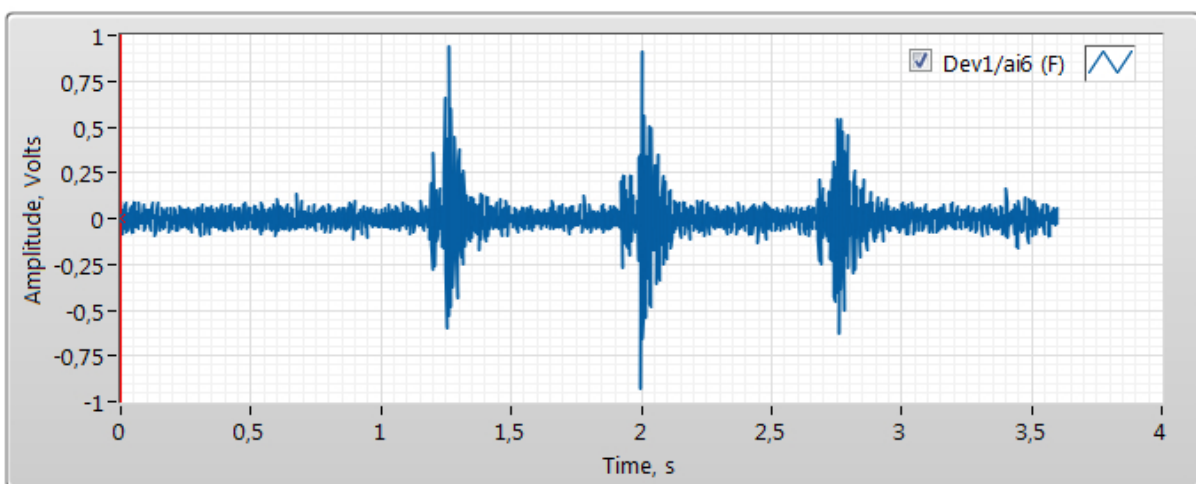
Výsledky z měření vibrací vyvolaných pěti různými osobami ve třech odlišných vzdálenostech - 1m, 2m, 3m :



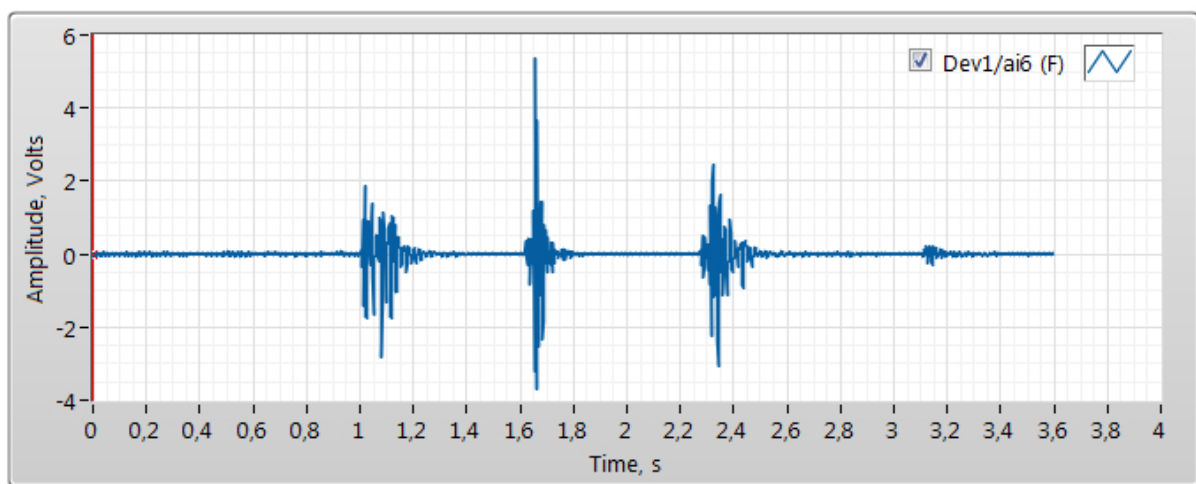
Obrázek 7.3: *Amplitudové spektrum vyvolané osobou č. 1 - 1m*



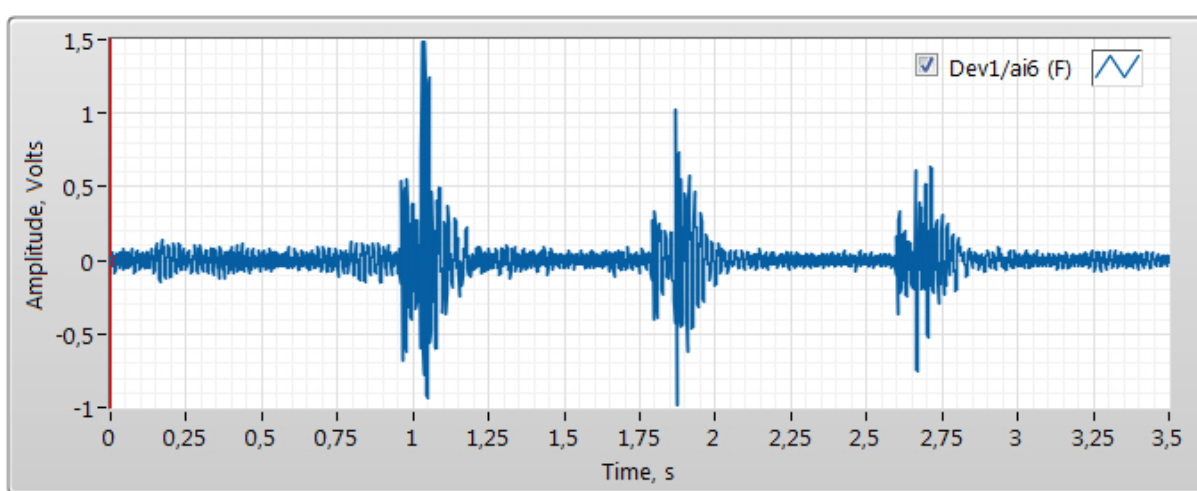
Obrázek 7.4: Amplitudové spektrum vyvolané osobou č. 1 - 2m



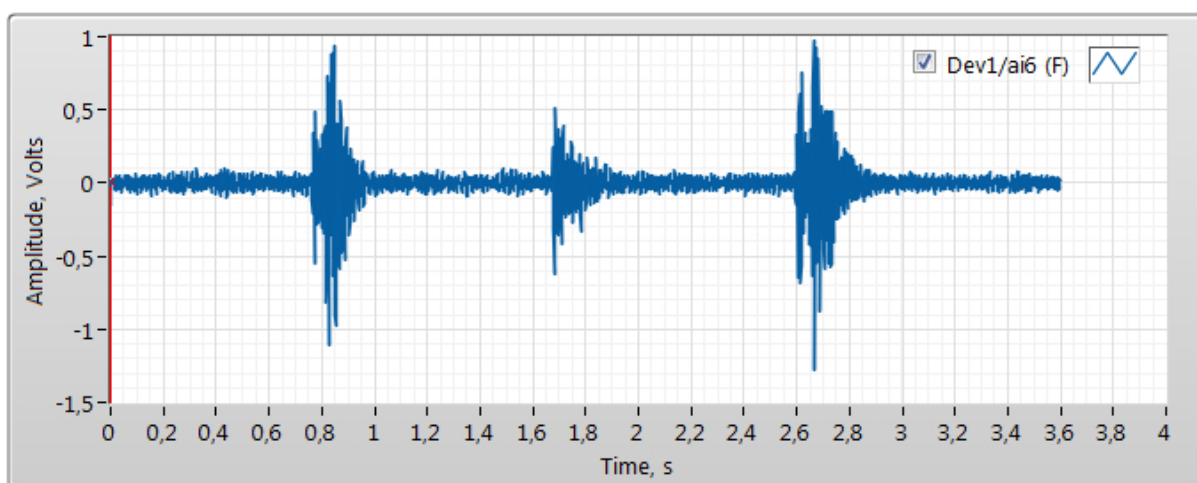
Obrázek 7.5: Amplitudové spektrum vyvolané osobou č. 1 - 3m



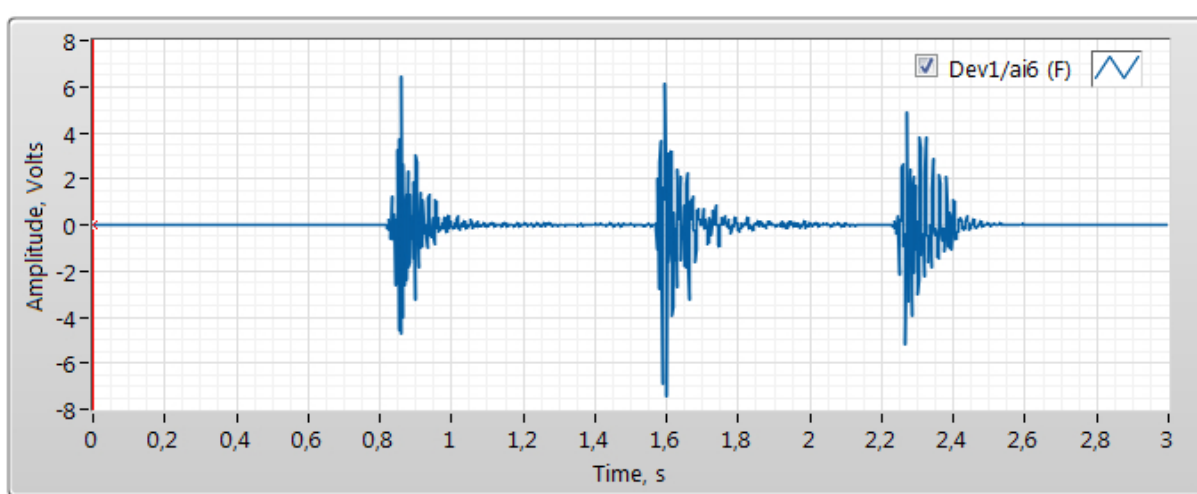
Obrázek 7.6: Amplitudové spektrum vyvolané osobou č. 2 - 1m



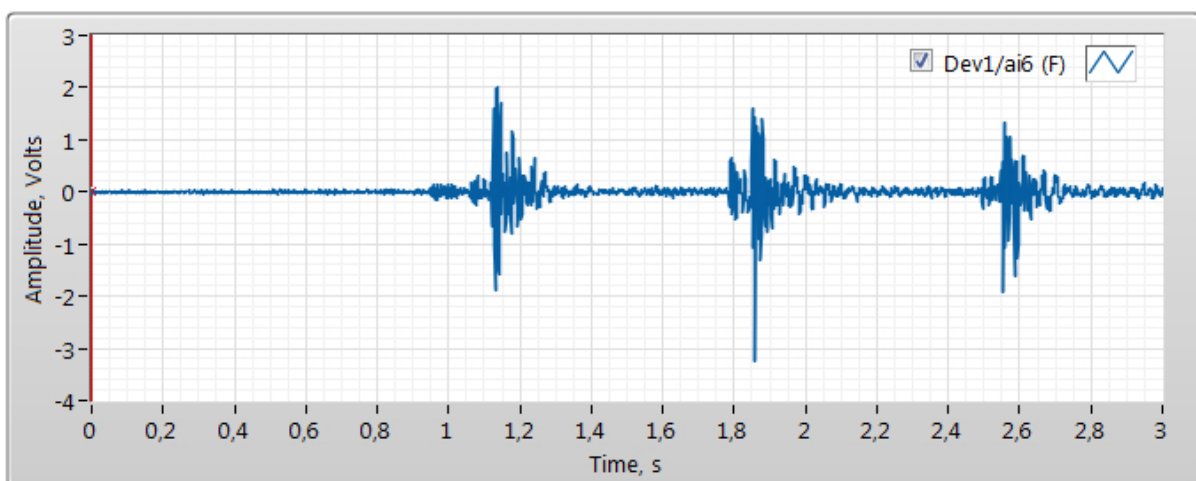
Obrázek 7.7: Amplitudové spektrum vyvolané osobou č. 2 - 2m



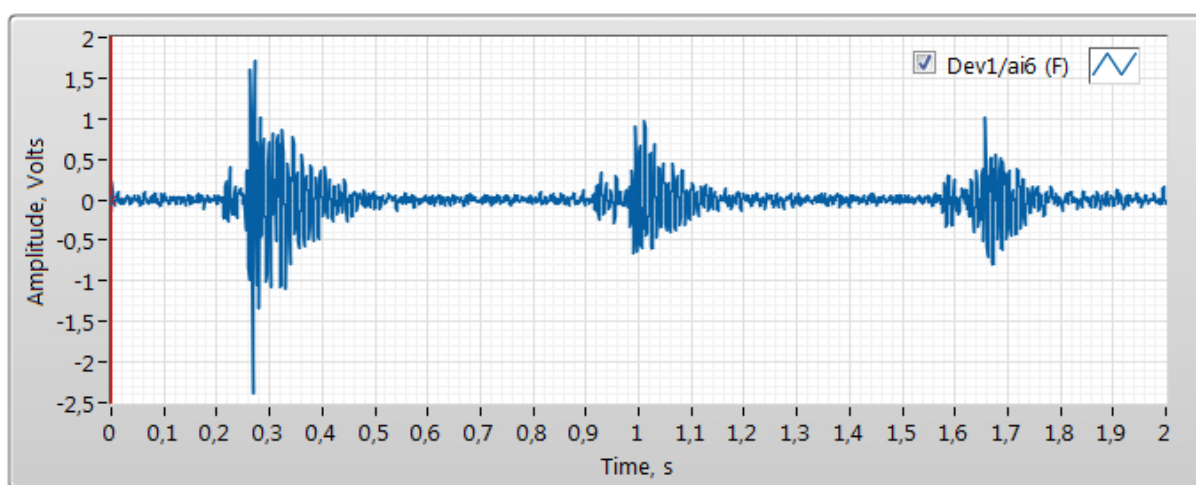
Obrázek 7.8: Amplitudové spektrum vyvolané osobou č. 2 - 3m



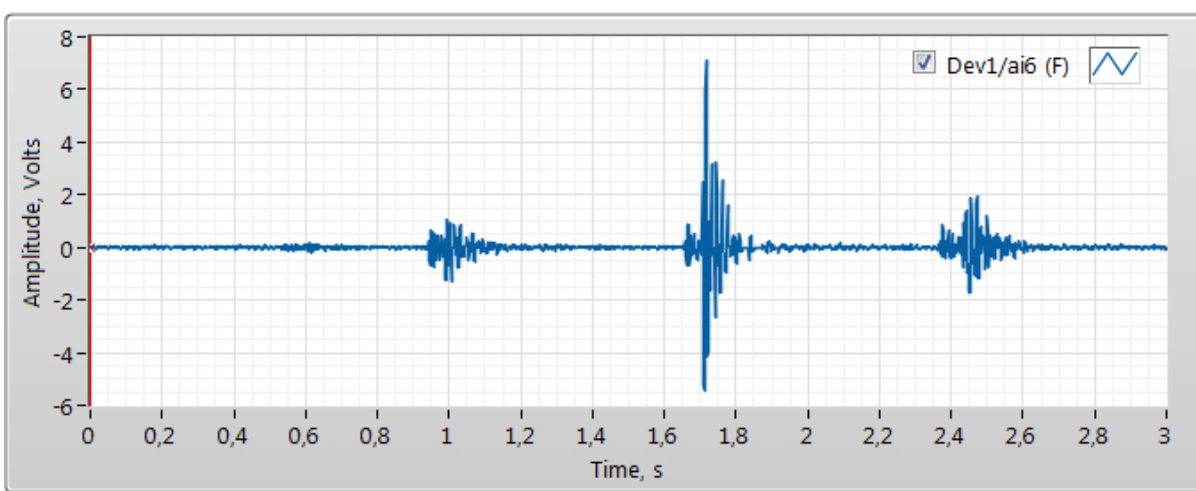
Obrázek 7.9: Amplitudové spektrum vyvolané osobou č. 3 - 1m



Obrázek 7.10: Amplitudové spektrum vyvolané osobou č. 3 - 2m

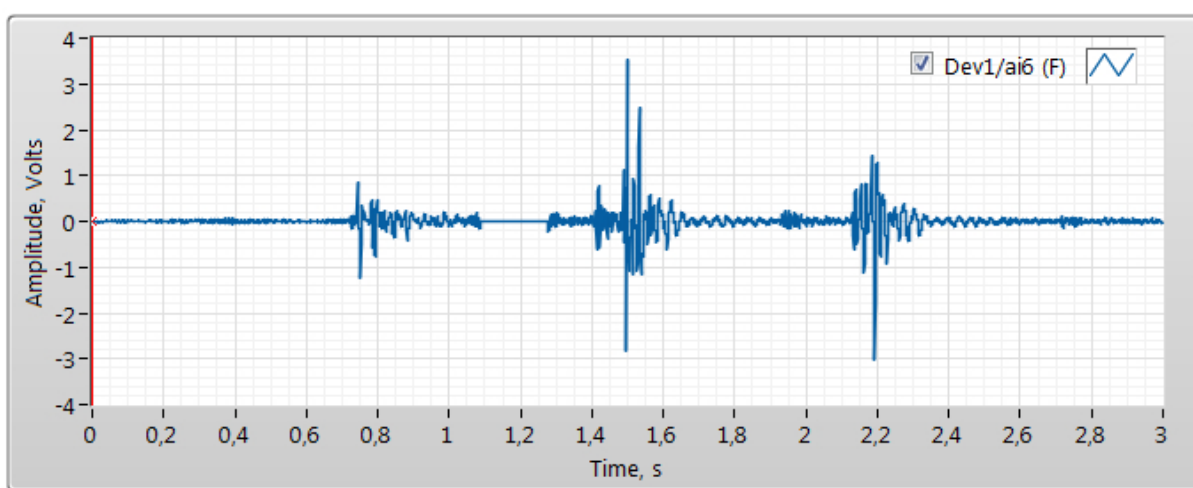


Obrázek 7.11: Amplitudové spektrum vyvolané osobou č. 3 - 3m

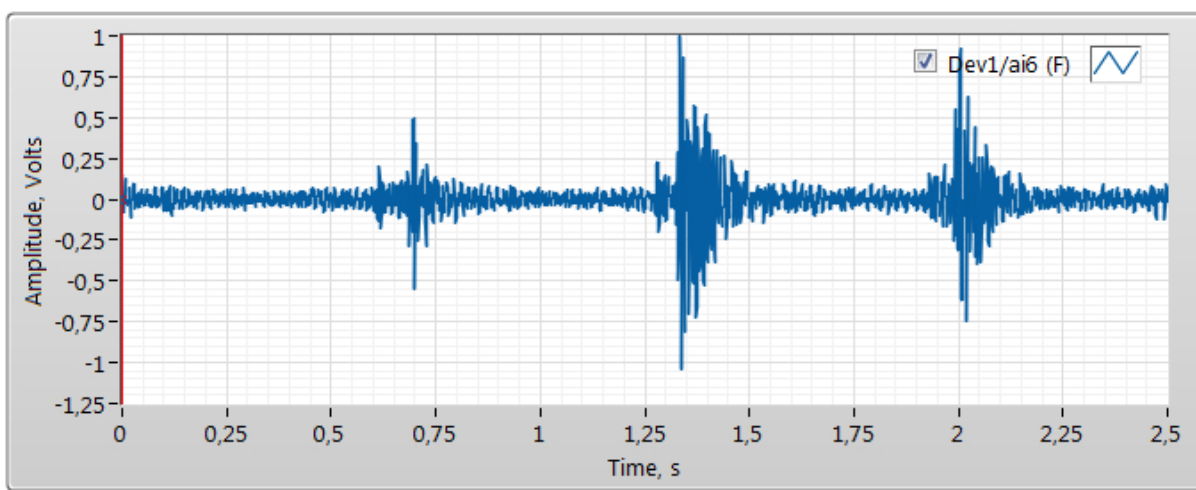


Obrázek 7.12: Amplitudové spektrum vyvolané osobou č. 4 - 1m

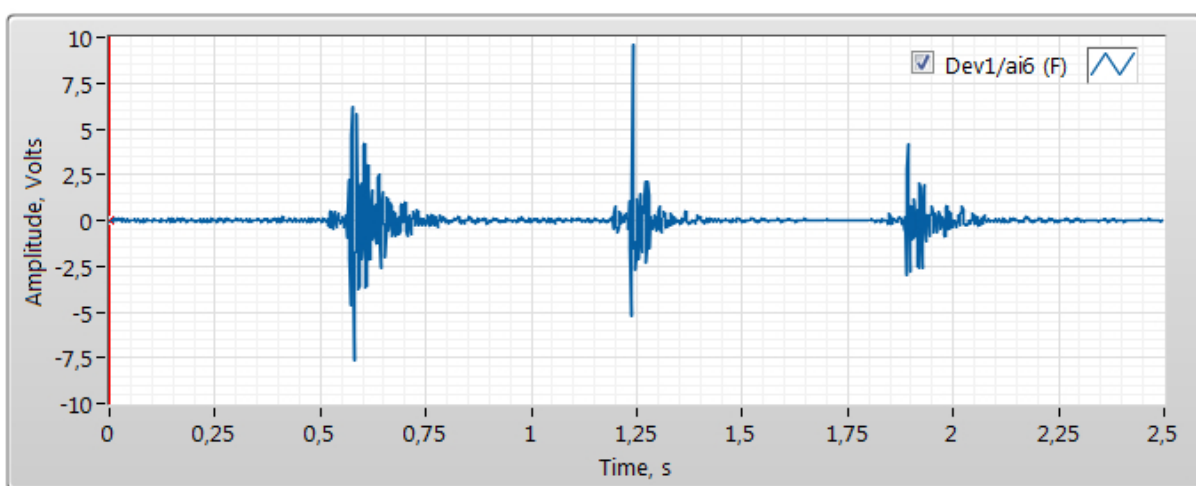




Obrázek 7.13: Amplitudové spektrum vyvolané osobou č. 4 - 2m

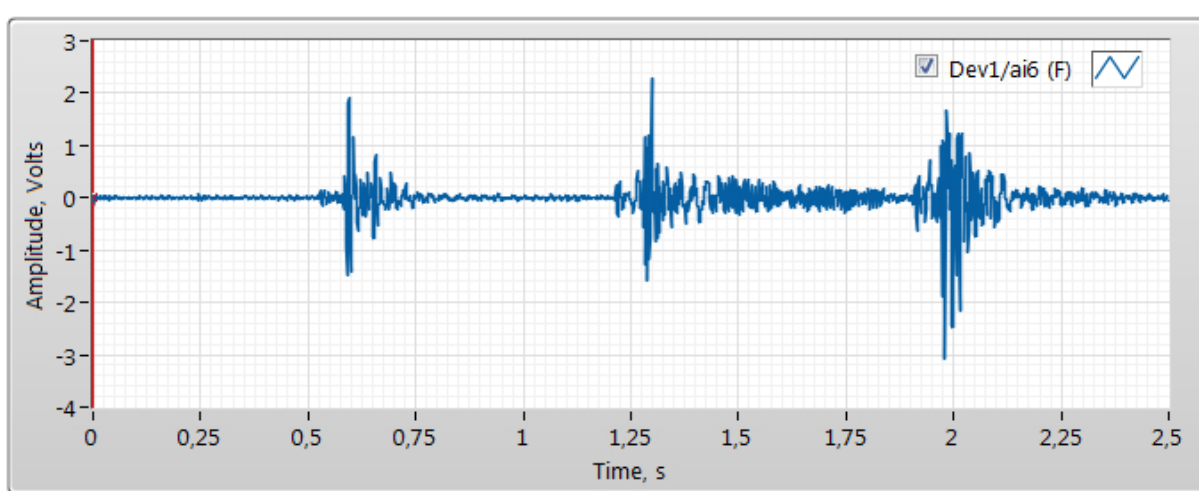


Obrázek 7.14: Amplitudové spektrum vyvolané osobou č. 4 - 3m

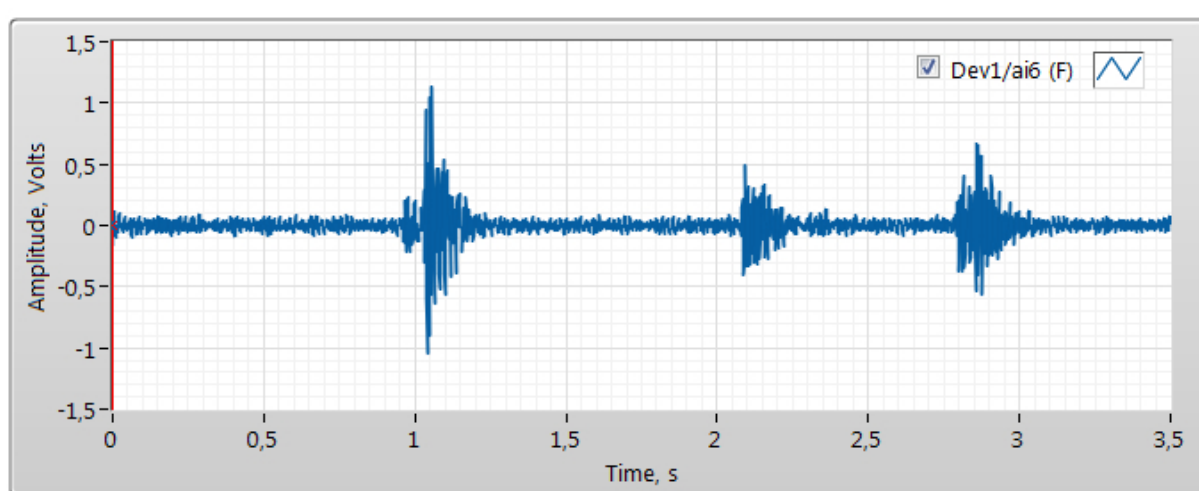


Obrázek 7.15: Amplitudové spektrum vyvolané osobou č. 5 - 1m





Obrázek 7.16: Amplitudové spektrum vyvolané osobou č. 5 - 2m



Obrázek 7.17: Amplitudové spektrum vyvolané osobou č. 5 - 3m

Ze všech proběhlých měření jsou patrné naměřené vibrace způsobené došlápnutím na podlahu. Délka amplitudy ve vzdálenosti 1m je největší, jelikož zdroj je nejbližší měřicího interferometru a nedochází, tak k velkému útlumu vibrací jako u větších vzdáleností. Hodnota amplitudy vyvolaná osobami ve vzdálenosti jednoho metru se pohybuje v rozmezí 3 až 8 V. Hodnota ve vzdálenosti dvou metrů je pochopitelně už poměrně menší 0,5 - 4 V. Ve vzdálenosti tří metrů je hodnota nejmenší. Velikost takové amplitudy zapříčiněné rozkmitáním podlahy osobou ze tří metrů je v rozmezí 0,5- 1,6 V. Pokud se podíváme na jednotlivé kroky ze zobrazených spekter, lze si všimnout, že u začátku každého došlápnutí je amplituda nejvyšší a v následujících okamžicích dochází k poklesu její hodnoty blížící se šumovému pozadí senzoru. To je způsobeno došlapem zbytku chodidla na podlahu. Nejprve při chůzi chodidlo dopadá patou na podlahu (v tomhle momentě je amplituda nejvyšší) a následovně poté i dopadá zbytek plochy chodidla se špičkou, která už nemá dostatečně velkou energii k vyvolání vibrací.

## **8 Porovnání naměřených dat vzhledem k šumovému pozadí, vyhodnocení úspěšnosti detekce testovacích osob**

Získaná data z měření šumu posloužili k tomu, abychom stanovili průměrnou hodnotu maximálních amplitud vyvolanou jen okolním prostředím (šumové pozadí senzoru). Průměrná odezva pozadí na interferometr byla spočítána z naměřených dat na hodnotu 0,186 V. Pro větší jistotu a přesnost, byla stanovena dostatečná úroveň odstupe signálu od šumu o cca 3 dB, tedy zhruba na hodnotu 0,3 V. Poté každý amplitudový vzruch nad touto hranicí byl pokládán za odezvu pohybu v blízkosti měřicího zařízení. U naměřených dat způsobených pohybem různých testovacích osob, jsou velmi dobře patrné pouhým okem amplitudové maxima od hodnoty 0,3 V.

U několika měření si lze velmi dobře všimnout nejvyšší amplitudy u druhého došlápnutí (2. kroku), což bylo důsledkem nejkratší vzdálenosti testovacích osob od interferometru. Aby k takovému výsledku docházelo pokaždé, je nutné vyvinout stejnou intenzitu všech tří kroků za sebou nebo alespoň podobnou. Výsledek je patrný z obrázku - 7.2, 7.3, 7.4, 7.6, 7.12, 7.13, 7.14, 7.15, 7.16.

S rostoucí vzdáleností chůze testovacích osob klesala hodnota maximálních vzruchů u jednotlivých došlápnutí. Hodnota vyvolaná osobou z 1m se nachází v intervalu od 3 V až po 8 V. U vzdálenosti 2m hodnotu popisuje interval 0,5 V až 4 V. U poslední a největší testovací vzdálenosti 3m od zdroje (osoba) amplituda nabývala hodnot od 0,5 V až 1,6V. Jednoduše řečeno s rostoucí vzdáleností od zdroje klesá naměřená hodnota amplitudy.

Z analýzy jednotlivých došlápnutí lze relativně přesně konstatovat, kdy dopadla pata chodidla na podlahu a ve kterém okamžiku je celé chodidlo ve styku s podlahou. V místě s nejvyšší amplitudou dochází k dopadu paty na podlahu, která přenáší největší část energie. Poté dochází k úbytku přenášené energie zbytku chodidla, které postupně taktéž dopadá na podlahu. Velice zřetelné z obrázku 7.9. Na základě amplitudového spektra druhého došlápnutí lze říci, že pata, která v čase 1,6s dopadá na podlahu, způsobuje velikost amplitudy 6 V. Následně dopadá v čase 1,8 na podlahu i zbytek chodidla, což je znázorněno poklesem amplitudy až přibližně k šumovému pozadí senzoru.

Pomocí všech naměřených dat bylo možné rozpoznat, kdy docházelo k zaznamenání chůze a kdy nikoli. Z analýzy lze také identifikovat množství kroků. Z celkových měření nedošlo k tomu, aby byla maximální amplituda jednotlivého došlápnutí pod hranicí 0,3 V. Na základě toho zjištění lze konstatovat, že senzor je schopný se 100% účinností detekovat testovací osoby ve vzdálenosti do 3m. Navazující výzkum například v rámci magisterské práce může otestovat i vyšší vzdálenost objektu od senzoru, ovšem tato skutečnost již nebyla předmětem této práce.

## Závěr

Práce se v teoretické části věnuje vysvětlení a pochopení vláknově optických interferometrů. V úvodní kapitole teoretické části se věnuji objasněním několika základních pojmů, vysvětlením světla z pohledu fyziky a interferenci světla. Tento jev se zabývá skládáním světla, jenž u interferometrů plní nejdůležitější roli. V následující teoretické části jsou sepsány principy šíření světla u různých typů optických vláken. Dále v práci popisuji obecnou funkčnost interferometrů a jejich rozdělení podle mnoha kritérií. V této části práce zabývám také vysvětlením a popisem několika nejpoužívanějších typů interferometrů. Celá poslední část se zabývá detailním popisem vláknově optického i obecného Mach-Zehnderova interferometru, který byl zvolen pro měření praktické části ve vláknově optické verzi.

Po sepsání teoretické části jsem se zaměřil na praktickou část, která je rozdělena do tří částí. V první části se věnuji popisu vybrané měřicí soustavy a vysvětlením úlohy zvolených prvků. Je zde uvedena také samotná konstrukce Mach-Zehnderova interferometru. Jakmile byla připravena měřicí soustava se sestaveným prototypem vláknově optického MZI citlivého na vibrační odezvu testovacích osob, bylo provedeno měření šumového pozadí senzoru. Měření sloužilo k ověření funkčnosti a stanovení hodnoty šumového pozadí. Po známé hodnotě šumu jsem stanovil hranici, nad kterou budou detekované vibrační vzruchy pokládány za pohyb. V dalším a již posledním měření došlo k zaznamenávání vibrací způsobené pěti testovacími osobami na různé vzdálenosti až do tří metrů. Na základě změřených dat, které jsou obsaženy v bakalářské práci, jsem byl schopný detekovat pohyb testovacích osob se 100% účinností.

Námětem práce bylo otestovat MZI jako použitelný senzor pro perimetrické systémy. Pro počátek výzkumu bylo zvoleno testování do 3m. Je možné, že by senzor obstál i ve větších vzdálenostech od testovacích objektů, čemuž by se mohla věnovat například navazující magisterská práce.

Po vykonání všech nutných měření a analyzování dat bylo úspěšně dokázáno, že sestavený Mach-Zehnderův interferometr je opravdu schopný vnímat vibrační odezvu od osob, tedy detekovat pohyb v místnosti. Své uplatnění tak může najít v perimetrických systémech.

---

## 9 Použitá literatura

1. **Maršálek, Leoš.** GOROnet. [Online] 2006. [Citace: 14. listopad 2015.]  
<http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>.
2. **Jandora R.; Poláček, Miroslav.** Neoficiální internetová fakulta všeho možného. [Online] 2000. [Citace: 14. listopad 2015.] <http://radek.jandora.sweb.cz/f25.htm>.
3. **Reichl, Jaroslav a Všeticka, Martin.** Encyklopedie fyziky. [Online] [Citace: 6. listopad 2015.]  
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/434-svetlo-jako-elektromagneticke-vlneni>.
4. **Fyzikální kabinet- Gymnázium J. Vrchlického, Klatovy.** [Online] [Citace: 22. únor 2016.]  
<http://kabinet.fyzika.net/studium/tabulky/index-lomu.php>.
5. **Krynický, M.** [www.realisticky.cz](http://www.realisticky.cz). [Online] [Citace: 15. listopad 2015.]  
<http://www.realisticky.cz/ucebnice/02%20Fyzika%20S%C5%A0/04%20Elekt%C5%99ina%20a%20magnetismus/07%20Elekt%C5%99ina%20a%20magnetismus%20v%20praxi/05%20Maxwellovy%20rovnice%20a%20elektromagnetick%C3%A9%20vln%C4%9Bn%C3%AD.pdf>.
6. **Technika a člověk.** [Online] [Citace: 19. listopad 2015.]  
[http://www.1sg.sk/www/data/01/projekty/2008\\_2009/innovators/technika\\_a\\_clovek/elektromagneticke\\_vlnenie.html](http://www.1sg.sk/www/data/01/projekty/2008_2009/innovators/technika_a_clovek/elektromagneticke_vlnenie.html).
7. **Fuka, Josef a Havelka, Bedřich.** *Optika a atomová fyzika: fyzikální kompendium pro vysoké školy.* Praha : Státní pedagogické nakladatelství, 1961.
8. **Kopečný, Jan, a další.** Studijní opory . [Online] 2006. [Citace: 21. prosinec 2015.]  
[http://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Fyzikaprobakalare/PDF/1\\_8\\_2\\_interf.pdf](http://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Fyzikaprobakalare/PDF/1_8_2_interf.pdf). ISBN-80-248-1200-2.
9. **Horák, Zdeněk a František, Krupka.** *Fyzika: příručka pro vysoké školy technického směru Svazek 1.* Praha : SNTL, 1976.
10. **Brabec, Petr a Bartůněk, Filip.** Fyzika 007. [Online] [Citace: 20. prosinec 2015.]  
<http://www.fyzika007.cz/optika/interference-svetla>.
11. **Gymnázium Ladislava Jaroše Holešov.** [Online] [Citace: 9. únor 2016.]  
[http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/08\\_interf/08\\_interf.htm](http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/08_interf/08_interf.htm).
12. **Kshitij education India.** [Online] [Citace: 5. únor 2016.] <http://www.kshitij-iitjee.com/Young%E2%80%99s-double-slit-experiment>.
13. **Matematika a fyzika.** [Online] [Citace: 8. prosinec 2015.]  
<http://mulle.mzf.cz/resources/Vlneni.pdf>.
14. **Reichl, Jaroslav a Všeticka, Martin.** Encyklopedie fyziky. [Online] [Citace: 26. 12 2015.]  
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/455-interference-v-praxi>.
15. **INFORMAČNÍ SYSTÉM MASARYKOVY UNIVERZITY.** [Online] 2010. [Citace: 2. leden 2016.] [https://is.muni.cz/el/1431/podzim2010/F3060/10\\_Koherence.doc](https://is.muni.cz/el/1431/podzim2010/F3060/10_Koherence.doc).

- 
16. Pavelek, Milan. ENERGETICKÝ ÚSTAV. [Online] [Citace: 5. leden 2016.] <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0206.htm>.
  17. Plexo. pctuning. [Online] 22. leden 2008. [Citace: 7. leden 2016.] <http://pctuning.tyden.cz/hardware/site-a-internet/9994?start=1>.
  18. Gep Arts. [Online] [Citace: 9. leden 2016.] <http://www.geparts.cz/vlakna/>.
  19. Kašík, Ivan a Peterka, Petr. Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR. [Online] [Citace: 5. únor 2016.] [http://www.ufe.cz/sites/default/files/peterka/fjfi/11\\_kasik\\_peterka\\_ccf\\_opticka\\_vlakna.pdf](http://www.ufe.cz/sites/default/files/peterka/fjfi/11_kasik_peterka_ccf_opticka_vlakna.pdf).
  20. Sýkora, J. Acces server. [Online] 28. červenec 2004. [Citace: 15. únor 2016.] <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2004072802>.
  21. Wikipedia. [Online] 18. únor 2014. [Citace: 15. únor 2016.] [https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%ADcevidov%C3%A9\\_optick%C3%A9\\_vl%C3%A1kno](https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%ADcevidov%C3%A9_optick%C3%A9_vl%C3%A1kno).
  22. Elektronická učebnice. [Online] [Citace: 14. únor 2016.] <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/824>.
  23. Skapa, Jan. Homel VSB. [Online] 11. březen 2011. [Citace: 11. prosinec 2015.] [http://homel.vsb.cz/~ska109/PSaM/06/UdKT\\_Opticke\\_vlaknove\\_komunikace.pdf](http://homel.vsb.cz/~ska109/PSaM/06/UdKT_Opticke_vlaknove_komunikace.pdf).
  24. Lukáš, Bubník, Klajbl, Jiří a Mazuch, Petr. Publi. [Online] 30. duben 2015. [Citace: 27. prosinec 2016.] <https://publi.cz/books/185/06.html>. ISBN 978-80-88058-20-5.
  25. Modulator laboratory. [Online] [Citace: 14. únor 2016.] [http://www.mlab.cz/WebSVN/filedetails.php?repname=svnkaklik&path=%2Fdokumenty%2FsKolni%2FZPOP%2Finterferometry%2FZPOP\\_03.pdf](http://www.mlab.cz/WebSVN/filedetails.php?repname=svnkaklik&path=%2Fdokumenty%2FsKolni%2FZPOP%2Finterferometry%2FZPOP_03.pdf).
  26. Jeřábek, Vítězslav. KATEDRA MIKROELEKTRONIKY. [Online] 2008. [Citace: 25. únor 2016.] <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34NFS/cviceni/Mach-Zehenderuv%20interferometr%20a%20prikklady.ppt>.
  27. Wikipedia. [Online] 9. srpen 2014. [Citace: 4. duben 2016.] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Interferometr>.
  28. Hanáček, F., Látal, J. a Koudelka, P. Elektrevue. [Online] 17. duben 2009. [Citace: 1. únor 2016.] <http://www.elektrevue.cz/file.php?id=200000301-6ddca6ed6a..> ISSN 1213-1539.
  29. Čermák, Petr. Ústav teoretické fyziky MFF UK. [Online] 19. prosinec 2001. [Citace: 14. únor 2016.] <http://utf.mff.cuni.cz/vyuka/OFY016/F2001/CermakP.htm>.
  30. Gaurav, Raj. ResearchGate. [Online] 30. červen 2014. [Citace: 3. březen 2016.] [https://www.researchgate.net/publication/263485253\\_Distributed\\_Fibre\\_Optic\\_Virtual\\_Fencing\\_System](https://www.researchgate.net/publication/263485253_Distributed_Fibre_Optic_Virtual_Fencing_System).
  31. The physics of rotation. [Online] 28. říjen 2012. [Citace: 1. březen 2016.] <http://www.cleonis.nl/physics/phys256/sagnac.php>.
  32. Bahrapour, Ali, a další. INTECH. [Online] [Citace: 28. leden 2016.] <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/33221.pdf>.

- 
33. ČVUT. [Online] [Citace: 20. únor 2016.]  
[http://departments.fsv.cvut.cz/k102/sites/default/files/k102/vyuka/predmety/soubory/LEOI-22\\_manual\\_cz.pdf](http://departments.fsv.cvut.cz/k102/sites/default/files/k102/vyuka/predmety/soubory/LEOI-22_manual_cz.pdf).
34. Wikina. [Online] 19. říjen 2014. [Citace: 16. únor 2016.] [http://www.wikina.cz/a/Fabryho-Perot%C5%AFv\\_interferometr](http://www.wikina.cz/a/Fabryho-Perot%C5%AFv_interferometr).
35. Davidson Physics. [Online] 1999. [Citace: 11. únor 2016.]  
[http://www.phy.davidson.edu/StuHome/cabell\\_f/diffractionfinal/pages/Fabry.htm](http://www.phy.davidson.edu/StuHome/cabell_f/diffractionfinal/pages/Fabry.htm).
36. Shamir, Joseph. *Optical Systems and Processes*. Bellingham : Spie-The International Society for Optical Engineering, 1999. ISBN: 0-8194-3226-1.
37. Wikipedia. [Online] 9. prosinec 2015. [Citace: 5. březen 2016.]  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Mach%E2%80%93Zehnder\\_interferometer](https://en.wikipedia.org/wiki/Mach%E2%80%93Zehnder_interferometer).
38. Pavelek, Milan. ENERGETICKÝ ÚSTAV. [Online] [Citace: 1. únor 2016.]  
<http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/1304.htm>.
39. Hariharan, P. *Basics of Interferometry*. San Diego : Academic Press, INC., 1992. ISBN 0-12-325218-0.
40. Zetie, K.P., a další. Princeton University. [Online] 8. červenec 1999. [Citace: 19. březen 2016.]  
[https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall06/cos576/papers/zetie\\_et\\_al\\_mach\\_zehnder00.pdf](https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall06/cos576/papers/zetie_et_al_mach_zehnder00.pdf).
41. Margaret, L., Tuma. NASA Technical Reports Server. [Online] květen 1995. [Citace: 6. únor 2016.] <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19950021485.pdf>.
42. EXFO. [Online] [Citace: 26. březen 2016.] <http://www.exfo.com/products/lab-manufacturing-testing/bu3-optical/light-sources-amplifiers/fls-2600b>.
43. e-LABORATORY PROJECT. [Online] [Citace: únor. 4 2016.]  
<http://www.ises.info/index.php/cs/laboratory/experiment/faraday/introduction>.
44. Turán, Jan. Fakulta elektrotechniky a informatiky TU v Košiciach. [Online] [Citace: 11. únor 2016.] [ftp://kemt-old.fei.tuke.sk/KEMT514\\_F/\\_materialy/Prednasky/Pr03/FO\\_3%20Prvky.pdf](ftp://kemt-old.fei.tuke.sk/KEMT514_F/_materialy/Prednasky/Pr03/FO_3%20Prvky.pdf).
45. RLC. [Online] [Citace: 5. březen 2016.] <http://www.rlc.cz/downloads/coupler.pdf>.
46. Alternativo. [Online] [Citace: 5. březen 2016.] [http://www.alternativo.cz/opticke-site-couplery-vykonove-delice\\_c1742.html](http://www.alternativo.cz/opticke-site-couplery-vykonove-delice_c1742.html).
47. Thorlabs. [Online] [Citace: 3. duben 2016.]  
<http://www.thorlabs.de/thorproduct.cfm?partnumber=PDA20H-EC>.
48. AmaPro. [Online] [Citace: 5. březen 2016.] <http://www.amapro.cz/public/ele/filtry.php>.
49. NATIONAL INSTRUMENTS. [Online] [Citace: 28. březen 2016.]  
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/203223>.

---

**50. Kategra fyzikální chemie- Univerzita Palackého v Olomouci. [Online] [Citace: 3. březen 2016.] [http://fch.upol.cz/wp-content/uploads/2015/11/APMS\\_prezentace\\_10.pdf](http://fch.upol.cz/wp-content/uploads/2015/11/APMS_prezentace_10.pdf).**

**51. Ontola. [Online] [Citace: 14. prosinec 2015.] <http://www.ontola.com/cs/di/fazovy-rozdil-interferujicich-vlneni>.**

**52. Tuma, Margaret L. Nasa Technical Reports Server. [Online] květen 1995. [Citace: 10. březen 2016.] <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19950021485.pdf>.**